

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA.

ESCUELA DE CIVIL.

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE LA CARPETA ASFÁLTICA MEDIANTE EL DISEÑO DE
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL MÉTODO MARSHALL CON
PIEDRA CALIZA COMO AGREGADO GRUESO**

AUTORES:

Fernanda Cristina Egas Gaete.

Alberto David Icaza Verdesoto.

DIRECTOR:

Ing. Gustavo Yáñez.

QUITO, 2018.

Dedicatoria.

A Dios por darme sabiduría y fuerza para llegar a este punto de mi vida y de mi carrera y encaminarme siempre por el camino del bien para lograr culminar mis estudios con éxito.

A mi madre Nilda Gaete, por toda la paciencia que me tuvo durante estos 5 años y por cada palabra y gesto de apoyo que me brindó en los días más difíciles de la carrera, por tantas veces que ha luchado para cumplir este sueño, por siempre darme valor y enseñarme tantas cosas para convertirme en la persona que soy hoy en día.

A mi padre Fernando Egas, que desde el cielo me guio para llegar a cumplir este reto, por educarme y enseñarme bastantes cosas que me iban a servir hoy en día, por tanta sabiduría que me compartió los pocos años que estuvo junto a mí y que me ayudo a llegar a este punto de mi vida.

A mi abuelita Ana Chiriboga, que sin su apoyo no hubiera podido estudiar la carrera, por su paciencia estos 5 años y por la energía que me brindo en cada momento difícil, por siempre creer en mí y brindarme su amor condicional todo este tiempo.

Egas Gaete Fernanda Cristina

Esta tesis está dedicada a:

A mis padres Alberto Icaza y Elizabeth Verdesoto quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y perseverancia, para seguir creciendo no solo en la parte académica sino como ser humano.

A mi hermano Andrés Icaza por su cariño y apoyo, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente, como mención especial a mi Abuelita ya que ella es parte fundamental en mi vida porque sin sus palabras de aliento, sus oraciones, todos los consejos y apoyo que me da no hubiese sido posible alcanzar este maravilloso logro.

Alberto Icaza Verdesoto.

Agradecimientos.

A Dios por guiarme en este duro camino y brindarme sabiduría y fuerza para culminar mis estudios.

A mi madre, por su amor incondicional, por su paciencia y optimismo durante este largo viaje, por siempre creer y demostrarme lo orgullosa que se siente por mí.

A mis abuelitas, por cada palabra de aliento que me hicieron sacar fuerzas para poder obtener el título, y por su ayuda económica y moral que me permitió convertirme en la mujer que soy ahora.

A mi Director de Tesis, Ing Gustavo Yanez que desde un principio nos brindó toda su disposición y tiempo para que lográramos culminar el proyecto de tesis de manera exitosa.

A los correctores, Ing. Jorge Albuja e Ing. Wilson Cando, que con su sabiduría y apoyo nos guiaron a realizar una tesis bien hecha.

A mis amigos, que durante estos 5 años de carrera me brindaron su amistad y apoyo tanto en los buenos como en los malos momentos, y que estuvieron conmigo cuando yo más los necesitaba me brindaron experiencias inolvidables desde el primer día.

A mi compañero de tesis, Alberto Icaza, por tenerme mucha paciencia durante la realización de la tesis, y por brindarme su amistad y apoyo desde el primer día de la carrera, por su responsabilidad y dedicación a este proyecto que sin él no hubiera sido posible realizarlo.

Egas Gaete Fernanda Cristina

Quiero agradecer a Dios por bendecir mi vida, por guiarme a lo largo de mi existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Mi profundo agradecimiento a mis padres y abuelita ya que el apoyo que siempre me brindaron hacen un triunfo no solo mío, sino de ellos ya que nunca les defraude y espero continuar así para regalarles siempre alegrías.

De igual manera mis agradecimientos a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, a toda la Facultad de Ingeniería, a mis profesores en especial al Ing. Gustavo Yáñez, Ing. Wilson Cando y al Ing. Jorge Albuja quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos y amistad hicieron posible la realización de este trabajo de investigación.

Además, agradecer a todos mis amigos, muchachos, por apoyarme cuando más las necesite, por extenderme su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias por estos 5 años de amistad.

Finalmente, y no menos importante a mi compañera y amiga de tesis Fernanda quien con su apoyo, paciencia, se logró realizar este maravilloso proyecto de investigación ya que sin ella no hubiésemos podido sacar esto adelante, gracias por el apoyo incondicional.

Alberto Icaza Verdesoto.

Contenido

Dedicatoria	II
Agradecimientos	IV
1. CAPITULO 1: GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.4. Objetivos.	3
1.4.1. Objetivo general:	3
1.4.2. Objetivos específicos:.....	4
1.5. Alcance.....	4
1.6. Metodología.....	5
2. CAPITULO II: AGREGADOS PÉTREOS Y CEMENTO ASFALTICO.....	6
2.1. Características de los materiales.	6
2.1.1. Cemento asfáltico.	6
2.1.2. Caracterización de los materiales granulares	9
2.1.2.1. Agregado grueso.	11
2.1.2.2. Agregado fino.	11
2.1.2.3. Piedra caliza.....	12
2.2. Mezclas asfálticas.....	12
2.2.1. Diseño de mezclas en caliente	14
2.2.2. Métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente.....	15
2.2.3. Mezclas asfálticas modificadas.....	16
3. CAPITULO III: ENSAYOS DEL CEMENTO ASFALTICO.....	17
3.1. Ensayo de penetración de materiales bituminosos (ASTM D-5)	18
3.1.1. Terminología.....	19
3.1.2. Resultados del ensayo de Penetración.....	19
3.1.2.1. Información general del ensayo.....	19
3.1.2.2. Valores de penetración de la muestra.	19
3.1.2.3. Especificación del Producto.....	19
3.2. Ensayo del horno de película delgada rodante (ASTM D-2872).....	20

3.2.1.	Resultados del ensayo RTFO.....	20
3.2.1.1.	Valores de RTFO.....	20
3.2.1.2.	Especificación del Producto.....	20
3.3.	Ensayo de gravedad específica de materiales bituminosos (ASTM D-70).	21
3.3.1.	Terminología.....	21
3.3.2.	Resultados del ensayo de Penetración.....	21
3.3.2.1.	Información general del ensayo.....	21
3.3.2.2.	Valores de gravedad específica de la muestra.....	22
3.4.	Ensayo de punto de chispa y llama con el equipo de copa abierta Cleveland (ASTM D-92) 22	
3.4.1.	Terminología.....	23
3.4.2.	Resultados del ensayo de chispa y llama.	23
3.4.2.1.	Valores de la muestra.....	23
3.4.2.2.	Especificación del Producto.....	23
3.5.	Ensayo de punto de reblandecimiento de materiales bituminosos (ASTM D 36). ...	24
3.5.1.	Terminología.....	24
3.5.2.	Resultados del ensayo del punto de reblandecimiento.	24
3.5.2.1.	Información general del ensayo.....	24
3.5.2.2.	Valores del punto de reblandecimiento de la muestra.....	25
3.6.	Índice de penetración de materiales bituminosos (D-3381).....	25
3.6.1.	Resultados del Índice de Penetración.....	25
3.6.1.1.	Información general del ensayo.....	25
3.6.1.2.	Especificación del Producto.....	26
3.7.	Ensayo de ductilidad de materiales bituminosos RTFO (ASTM D-113).....	26
3.7.1.	Terminología.....	27
3.7.2.	Resultados del ensayo de ductilidad.....	27
3.7.2.1.	Información general del ensayo.....	27
3.7.2.2.	Valores de la muestra.....	27
3.7.2.3.	Especificación del Producto.....	28
3.8.	Ensayo de viscosidad cinemática a 135 °C (ASTM D-2170).....	28
3.8.1.	Terminología.....	28
3.8.2.	Resultados del ensayo de Viscosidad Cinemática a 135 C.....	29
3.8.2.1.	Información general del ensayo.....	29
3.8.2.2.	Valores de la viscosidad cinemática a 135 C.....	29

3.8.2.3.	Especificación del Producto.....	29
3.9.	Ensayo de viscosidad a 60 °C al residuo envejecido RTFO (ASTM D 2171).....	30
3.9.1.	Resultados del ensayo de Viscosidad a 60 °C RTFO.....	30
3.9.1.1.	Información general del ensayo.....	30
3.9.1.2.	Valores de la viscosidad a 60 °C RTFO.....	31
3.9.1.3.	Especificación del Producto.....	31
3.10.	Ensayo de viscosidad a 60 °C al residuo original (ASTM D 2171).....	31
3.10.1.	Resultados del ensayo de Viscosidad al residuo original.....	32
3.10.1.1.	Información general del ensayo.....	32
3.10.1.2.	Valores de la viscosidad a 60 C.....	32
3.10.1.3.	Especificación del Producto.....	32
3.11.	Carta de viscosidad (ASTM D-2493).....	33
3.11.1.	Resultados De la carta de viscosidad.....	33
3.11.1.1.	Información general del ensayo.....	33
3.11.1.2.	Valores de la carta de viscosidad.....	33
4.	CAPITULO 4: ENSAYO DE LOS AGREGADOS.....	34
4.1	Granulometría (ASTM D422).....	35
4.1.1.	Granulometría de agregados gruesos y piedra caliza.....	35
4.1.1.1.	Resultados del ensayo de granulometría de agregados grueso.....	36
4.1.2.	Granulometría de agregados finos.....	39
4.2.	Abrasión por la máquina de los ángeles (ASTM C 131).....	40
4.2.1.	Resultados del ensayo de abrasión.....	41
4.2.1.1.	Valores de muestra de agregado grueso y piedra caliza.....	41
4.2.1.2.	Especificaciones del producto.....	41
4.3.	Equivalente de arena (ASTM D-2419).....	42
4.3.1.	Resultados del ensayo de equivalente de arena.....	42
4.3.1.1.	Valores de la muestra.....	42
4.3.1.2.	Especificación del Producto.....	43
4.4.	Gravedad específica y absorción de los agregados.....	43
4.4.1.	Terminología.....	43
4.4.2.	Gravedad específica y absorción del agregado grueso y piedra caliza (ASTM C127) 44	
4.4.2.1.	Resultados del ensayo de Gravedad específica.....	45
a.	Valores del ensayo.....	45

4.4.3.	Gravedad específica y absorción de los agregados finos (ASTM C128).....	46
4.4.3.1.	Resultados del ensayo de Gravedad específica y absorción de los agregados finos.....	46
a.	Valores del ensayo.....	46
4.5.	Resistencia a los sulfatos (ASTM C-88).....	47
4.5.1.	Resultados del ensayo de resistencia a los sulfatos.....	48
4.5.1.1.	Valores del ensayo.....	48
4.5.1.2.	Especificaciones del producto.....	49
4.6.	Ensayo de deletéreos (ASTM C-142).....	49
4.6.1.	Resultados del ensayo de deletéreos.....	50
4.6.1.1.	Valores del ensayo.....	50
4.6.1.2.	Especificaciones del producto.....	50
4.7.	Angularidad de los agregados pétreos (ASTM D-5821).....	50
4.7.1.	Terminología.....	50
4.7.2.	Angularidad de los agregados gruesos.....	51
4.7.2.1.	Resultados del ensayo de angularidad para agregados gruesos.....	51
a.	Valores del ensayo.....	51
b.	Especificaciones del producto.....	52
4.7.3.	Angularidad de los agregados finos.....	52
4.7.3.1.	Resultados del ensayo de angularidad de los agregados finos.....	53
a.	Valores del ensayo.....	53
b.	Especificaciones del producto.....	53
4.8.	Ensayo de partículas alargadas y planas (ASTM D-4791).....	54
4.8.1.	Resultado del ensayo de partículas alargadas y planas.....	54
4.8.1.1.	Valores del ensayo.....	54
4.8.1.2.	Especificaciones del producto.....	55
5.	CAPÍTULO 5: ENSAYOS SOBRE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	55
5.1.	Mezcla de agregados.....	57
5.2.	Diseño de Mezcla Asfáltica.....	59
5.2.1.	Peso específico Bulk.....	61
5.2.2.	Peso Específico Bruto del Agregado Total.....	62
5.2.3.	Peso Específico Máximo Teórico.....	63
5.2.4.	Peso Específico Máximo Medido (Rice).....	64
5.2.4.1.	Peso Específico Efectivo del Agregado.....	65

5.2.4.2.	Asfalto Absorbido.	66
5.2.4.3.	Relación Filler/Asfalto.	67
5.2.4.4.	Volumen de agregado vs Volumen total.	68
5.2.4.5.	Vacíos con aire.	69
5.2.4.6.	Vacíos con agregado mineral (VAM).	70
5.3.	Método Marshall.	71
5.3.1.	Graficas.	73
6.	Análisis de Resultados.	76
6.1.	Resultados del Cemento Asfáltico.	76
6.2.	Resultados de los Agregados.	77
6.2.1.	Agregado Fino.	77
6.2.2.	Agregado Grueso.	78
6.2.3.	Piedra Caliza.	78
6.3.	Resultado de la Mezcla Asfáltica.	79
6.3.1.	Obtención del Porcentaje Óptimo de Asfalto.	80
6.4.	Ensayos con el Óptimo de Asfalto.	82
6.5.	Método Marshall con el Óptimo de Asfalto.	83
7.	CAPITULO 7. ANÁLISIS DE COSTOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	88
7.1.	Costos directos.	88
7.1.1.	Costo directo de la mezcla convencional.	89
7.1.2.	Costo directo para la mezcla asfáltica modificada.	91
7.2.	Costos indirectos.	93
7.3.	Costo total.	93
7.3.1.	Costo total de la mezcla convencional.	93
7.3.2.	Costo total de la mezcla modificada.	94
8.	Conclusiones.	94
9.	Bibliografía.	96

Contenido de tablas

Tabla 3.1. Requisitos de Cementos Asfálticos de viscosidad a 60 °C a base de asfalto original de 220 dm a 40 dmm de penetración.	17
Tabla 3.2. Requisitos de Cementos Asfáltico viscosidad a 60 C a base de asfalto original. ...	18
Tabla 3.3. Información general del ensayo de penetración.	19
Tabla 3.4. Valores de penetración de la muestra.	19
Tabla 3.5. Especificación del Ensayo de penetración.	19
Tabla 3.6. Valores de RTFO.	20
Tabla 3.7. Especificación del Ensayo RTFO.	20
Tabla 3.8. Información general del ensayo de penetración.	21
Tabla 3.9. Valores de penetración de la muestra.	22
Tabla 3.10. Valores de chispa y llama de la muestra.	23
Tabla 3.11. Especificación del Ensayo de chispa y llama.	23
Tabla 3.12. Información general del ensayo de punto de reblandecimiento.	25
Tabla 3.13. Valores del punto de ablandamiento de la muestra.	25
Tabla 3.14. Información general del índice de penetración.	26
Tabla 3.15. Especificación del Índice de Penetración.	26
Tabla 3.16. Información general del ensayo de ductilidad RTFO.	27
Tabla 3.17. Valores de ductilidad de la muestra RTFO.	28
Tabla 3.18. Especificación del Ensayo de ductilidad RTFO.	28
Tabla 3.19. Información general del ensayo de Viscosidad cinemática a 135 °C.	29
Tabla 3.20. Valores de Viscosidad cinemática de la muestra.	29
Tabla 3.21. Especificación del Ensayo.	29
Tabla 3.22. Información general del ensayo de Viscosidad a 60 °C RTFO.	31
Tabla 3.23. Valores de Viscosidad a 60 C de la muestra.	31
Tabla 3.24. Especificación del Ensayo.	31
Tabla 3.25. Información general del ensayo de Viscosidad al residuo original.	32
Tabla 3.26. Valores de Viscosidad a 60 °C de la muestra.	32
Tabla 3.27. Especificación del Ensayo.	32
Tabla 3.28. Información general de la carta de viscosidad.	33
Tabla 3.29. Valores de la carta de viscosidad.	33
Tabla 4.1. Abertura de tamices.	35
Tabla 4.2. Valores de granulometría del agregado grueso.	36
Tabla 4.3. Valores de granulometría del agregado intermedio.	37
Tabla 4.4. Valores de granulometría de la piedra caliza.	38
Tabla 4.5. Especificaciones de granulometría para agregado grueso.	39
Tabla 4.6. Granulometría del agregado fino.	40
Tabla 4.7. Valores de abrasión para el agregado grueso y piedra caliza.	41
Tabla 4.8. Especificaciones del Ensayo de abrasión.	41
Tabla 4.9: Valores de equivalente de arena.	42
Tabla 4.10. Especificaciones para el Ensayo de equivalente de arena.	43
Tabla 4.11. Especificación del ensayo.	43
Tabla 4.12. Valores de Gravedad Específica y Absorción para agregados grueso y piedra caliza.	45
Tabla 4.13. Valores de Gravedad específica para el agregado fino.	47
Tabla 4.14. Valores del desgaste a los sulfatos en los agregados gruesos.	48

Tabla 4.15. Valores del desgaste a los sulfatos en agregados finos.....	48
Tabla 4.16. Especificaciones del ensayo.....	49
Tabla 4.17. Valores del ensayo de delecténeos para agregado fino y agregado grueso.....	50
Tabla 4.18. Especificaciones para el ensayo de delecténeos.....	50
Tabla 4.19. Valores de partículas fracturadas para agregado grueso y piedra caliza.....	52
Tabla 4.20. Especificaciones para partículas fracturadas de un cara fracturada.....	52
Tabla 4.21. Especificaciones para partículas fracturadas de dos o más caras fracturadas.....	52
Tabla 4.22. Resultados para partículas angulares agregado fino.....	53
Tabla 4.23. Especificaciones del ensayo de angularidad para agregado fino.....	54
Tabla 4.24. Valores del ensayo de partículas alargadas y planas para agregado grueso.....	54
Tabla 4.25. Valores del ensayo para partículas alargadas y planas para piedra caliza.....	55
Tabla 4.26. Especificaciones del ensayo de partículas alargadas y planas.....	55
Tabla 5.1. Tabla de Granulometrías (MOP - 001-F , 2002).....	58
Tabla 5.2. Porcentaje de material para la realización de las briquetas.....	59
Tabla 5.3. Porcentaje Inicial de cemento asfáltico.....	60
Tabla 5.4. Peso Especifico Bulk.....	62
Tabla 5.5. Peso Especifico Bruto del Agregado Total.....	63
Tabla 5.6. Peso Especifico Máximo Teórico.....	64
Tabla 5.7. Peso Especifico Máximo Medido (Rice).....	65
Tabla 5.8. Peso Especifico Efectivo del Agregado.....	66
Tabla 5.9. Asfalto Absorbido.....	66
Tabla 5.10. Relación Filler/Asfalto.....	67
Tabla 5.11. Volumen agregado Vs volumen total.....	68
Tabla 5.12. Vacíos con aire.....	69
Tabla 5.13. Vacíos con aire.....	70
Tabla 5.14. Factor de Corrección de la Estabilidad (MOP - 001-F , 2002).....	72
Tabla 6.1. Resumen de los ensayos obtenidos del Cemento Asfáltico.....	77
Tabla 6.2. Resumen de los ensayos obtenidos del Agregado Fino.....	78
Tabla 6.3. Resumen de los ensayos obtenidos del Agregado Fino.....	78
Tabla 6.4. Resumen de los ensayos obtenidos del Agregado Fino.....	79
Tabla 6.5. Datos para la obtención de las curvas.....	81
Tabla 6.6. Especificaciones del Marshall (MOP - 001-F , 2002).....	82
Tabla 6.7. Especificaciones del VAM (MOP - 001-F , 2002).....	82
Tabla 6.8. Valores Obtenidos.....	82
Tabla 6.9. Variación de Piedra Caliza.....	83
Tabla 6.10. Primer Porcentaje.....	84
Tabla 6.11. Segundo Porcentaje.....	84
Tabla 6.12. Tercer Porcentaje.....	84
Tabla 6.13. Mezcla modificada.....	86
Tabla 6.14. Valores de estabilidad y flujo de la mezcla modificada.....	86
Tabla 7.1. Costo de ensayo de los agregados para la mezcla convencional.....	91
Tabla 7.2. Costo del ensayo del cemento asfáltico.....	91
Tabla 7.3. Costo del ensayo Marshall para mezcla convencional.....	92
Tabla 7.4. Dosificación para la mezcla convencional.....	92
Tabla 7.5. Costo del transporte de agregados para la mezcla convencional.....	92
Tabla 7.6. Costo de ensayos de agregados para la mezcla modificada.....	93

Tabla 7.7. Costo del ensayo de asfalto para la mezcla modificada.....	93
Tabla 7.8. Costo del ensayo de diseño Marshall para la mezcla modificada.....	94
Tabla 7.9. Dosificación para la mezcla modificada.....	94
Tabla 7.10. Costo del transporte de los agregados de la mezcla asfáltica modificada.....	94

Contenido de ilustraciones

Ilustración 3.1. Carta de Viscosidad.....	34
Ilustración 5.1. Granulometría de los agregados para la Mezcla.....	58
Ilustración 5.2. Valores máximos y mínimos de la curva junto a los Tamices (mm).....	59
Ilustración 5.3. Vacíos con Aire.....	73
Ilustración 5.4. Gravedad Bulk.....	73
Ilustración 5.5. Vacíos con asfalto.....	74
Ilustración 5.6. VAM.....	75
Ilustración 5.7. Estabilidad.....	75
Ilustración 5.8. Flujo.....	76
Ilustración 6.1. Resultado de la Mezcla.....	80
Ilustración 6.2. Resultados de estabilidad y flujo.....	81
Ilustración 6.3. Vacíos con aire de la mezcla modificada.....	87
Ilustración 6.4. Estabilidad de la mezcla modificada.....	87
Ilustración 6.5. Flujo de la mezcla modificada.....	88
Ilustración 6.6. VAM de la mezcla modificada.....	88
Ilustración 6.7. Vacíos con asfalto de la mezcla modificada.....	89
Ilustración 6.8. Flujo Vs estabilidad de la mezcla modificada.....	89

1. CAPITULO 1: GENERALIDADES.

1.1. Introducción.

Actualmente la mezcla asfáltica más utilizadas en Ecuador es la mezcla asfáltica en caliente (MAC). La capa de rodadura es la mezcla asfáltica en caliente (MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS DEL ECUADOR, 2013), lo cual se forma de una mezcla de agregados junto con asfalto. Debido a que en Quito no hay minas de piedra caliza, se optara por reemplazar el material de la cementera de Selva Alegre.

Por este problema, nos veremos en la obligación de realizar los estudios de piedra caliza, con minas de la cementera Selva Alegre, debido a que no se cuenta con el material en Quito. Al reemplazar el agregado grueso con piedra caliza, se modificarán propiedades de la mezcla asfáltica, por lo que se tendrá que realizar un estudio técnico para ver este comportamiento, además de verificar si cumple las especificaciones técnicas. Será necesario realizar en la investigación un análisis de costos para ver si su remplazo es conveniente tanto técnica como económicamente.

Por los antecedentes mencionados, se hará una investigación de las propiedades mecánicas y físicas de la nueva mezcla asfáltica utilizando la piedra caliza como agregado grueso por el método Marshall comprobando así que este nuevo diseño será óptimo y beneficioso desde todo punto de vista, para la construcción de carreteras con mezclas asfálticas en caliente. Esta investigación se llevará a cabo en el Laboratorio de Pavimentos de la PUCE donde se realizarán todos los ensayos correspondientes de acuerdo a la norma ASTM D-1559 (1998) correspondiente a mezclas asfálticas en caliente con el método Marshall.

1.2. Antecedentes.

En la ciudad de México, en la Pontificia Universidad Javeriana se han realizado ensayos de Marshall sustituyendo la piedra caliza como agregado grueso con el fin de comprobar si dicho material mejora las propiedades del suelo. Estos ensayos se han realizado con materiales de plantas asfálticas de varios estados del país y se han logrado resultados importantes y favorables para mejorar las propiedades mecánicas del pavimento, sin embargo, no se han realizado investigaciones que comprueben que la mezcla con piedra caliza es económicamente rentable con respecto a la mezcla asfáltica con el agregado grueso obtenido en minas.

Actualmente en el Ecuador no se ha realizado ninguna investigación con respecto a este tema, por lo tanto, se pretende realizar la investigación no solo enfocándose en el mejoramiento de las propiedades mecánicas sino también en encontrar un material más económico y asequible.

Tomando en cuenta los problemas existentes en el país, principalmente en la provincia de Pichincha (zona de influencia de esta investigación), donde por la falta de recursos y materiales de calidad se presentan muchos problemas en las vías, sobre todo la aparición de baches según el constructor Oscar Yacelga (La Hora, 2008), se pretende evaluar los materiales y la mezcla mencionados en esta investigación con el fin de obtener una mezcla que cumpla con los requisitos de economía, calidad y asequibilidad.

1.3. Justificación.

La presente investigación está destinada a determinar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica utilizando piedra caliza como agregado grueso, con el fin de comprobar si este material mejorará las propiedades de la misma.

Los ensayos se realizarán utilizando el método Marshall, con asfalto obtenidos de la planta asfáltica del Municipio de Quito y los agregados de la mina de Guayllabamba localizada en la ciudad de Quito y la piedra caliza será proporcionada por la cementera Selva Alegre ubicada en el km 7, vía Otavalo. Utilizando los materiales anteriormente mencionados, se realizarán los respectivos ensayos en el laboratorio de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

La investigación propuesta está direccionada para el desarrollo de las vías en la provincia de Pichincha, mediante el estudio de la mezcla asfáltica utilizando únicamente la piedra caliza de Selva Alegre y los materiales ya mencionados. No obstante, es importante reconocer que se pueden realizar varias combinaciones de materiales, es decir, se puede obtener los agregados o asfalto de otra planta ubicada en la misma zona de influencia.

Para poder realizar correctamente una comparación entre la mezcla utilizando el agregado grueso obtenido en minas y la mezcla utilizando piedra caliza, es necesario realizar un estudio de costos para saber que la mezcla, a más de presentar una mejora en la calidad del pavimento asfáltico, es económicamente rentable.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general:

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente utilizando la piedra caliza como agregado grueso mediante el método Marshall especificado en la norma ASTM D1559 (1998).

1.4.2. Objetivos específicos:

- Identificar las propiedades de la piedra caliza y los agregados a utilizar en la mezcla asfáltica.
- Determinar el porcentaje de agregado fino, agregado intermedio y piedra caliza que formaran una combinación óptima que se utilizará para la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente especificados en la norma MOP-001-F 2002.
- Realizar los diferentes ensayos de laboratorio aplicando el método de Marshall especificado en la norma ASTM D-1559-89
- Analizar los resultados obtenidos en laboratorio y comprobar si es que la piedra caliza proporciona una mejor calidad a la mezcla asfáltica en caliente y si es viable utilizarla en el ámbito de la construcción.
- Realizar un estudio de costos con el fin de comparar no solo las propiedades mecánicas de las dos mezclas asfálticas si no también el costo de cada una de ellas.

1.5. Alcance.

Para el mejoramiento de la carpeta asfáltica mediante el diseño de mezcla asfáltica en caliente con piedra caliza como agregado grueso se procederá a utilizar el método Marshall, mediante ensayos para los diferentes agregados en el laboratorio de Ingeniería Civil, de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, con los equipos que cuenta el laboratorio, conforme a las normas correspondientes de la AASHTO y/o ASTM.

La piedra caliza será proporcionada de la cementera Selva Alegre ubicada en el km 7, vía Otavalo, además se usará para los ensayos un asfalto, el cual será facilitado de la planta asfáltica del Municipio Metropolitano de Quito ubicada en la Simón Bolívar e Interoceánica y de la mina de Guayllabamba donde se proporcionarán el agregado fino, intermedio y grueso.

1.6. Metodología.

Debido a que gran parte del país se utilizan pavimentos flexibles se va a realizar ensayos correspondientes para determinar las propiedades mecánicas de los materiales a utilizarse ya que están directamente relacionados en los resultados de la mezcla asfáltica en caliente. Por ende, se realizará varios ensayos para determinar qué tan adecuado y fiable es la utilización de piedra caliza en reemplazo del material grueso.

Los ensayos a realizarse para determinar los objetivos planteados son;

- Granulometría de los agregados.
- Tipo y calidad de los áridos.
- Contenido de asfalto en la mezcla.
- Calidad del ligante.

Ya que la piedra caliza será obtenida de la cementera Selva Alegre ubicada vía Otavalo, el asfalto del Municipio de Quito y los agregados de la mina de Guayllabamba, se analizará un área de influencia cercana al sector analizado ya que los materiales que se tomaran son de esa zona.

2. CAPITULO II: AGREGADOS PÉTREOS Y CEMENTO ASFALTICO.

2.1. Características de los materiales.

2.1.1. Cemento asfáltico.

El cemento asfáltico se obtiene de la extracción de petróleo crudo que se encuentran en pozos muy profundos y que posteriormente se realiza la refinación del mismo para así obtener el asfalto que viene a ser el residuo del petróleo extraído.

Es un material que se utiliza usualmente en la construcción de todo tipo de vías ya sean calles, autopistas, carreteras y aeropuertos, ya que presenta características cementantes, impermeables, adhesión y cohesión, elevada elasticidad, entre otras cualidades muy importantes que permiten que el cemento asfáltico sea un material bastante versátil en varios campos de la construcción. El cemento asfáltico se presenta como un material semisólido y bastante viscoso sin embargo es necesario llevarlo a un estado líquido para poder bombearlo, transportarlo en cisternas, mezclarlos con agregados, etc. En la actualidad se utilizan tres procesos para poder llevarlo del estado semisólido al estado líquido:

- **Elevándolo a altas temperaturas:** se somete a temperaturas bastante elevadas para que se transforme en un líquido y así proceder a realizar cualquier mezcla o acción con este material. Una vez que el cemento se enfría vuelve a su estado inicial de semisólido.
- **Solventes en el cemento asfáltico:** a este proceso se le denomina cutting back y consiste en diluir el cemento en solventes de petróleo los mismo que una vez colocada la mezcla en la construcción de la vía este solvente se evapora quedando solamente el cemento asfalto. Sin embargo, este método

no se utiliza mucho actualmente por la escasez del petróleo y por algunas condiciones gubernamentales.

- **Mezclándolo con agua:** para este proceso se utiliza un molino que sirve para que el cemento asfáltico y el agua se puedan mezclar ya que en condiciones naturales estas dos sustancias no se mezclan, durante este proceso se mezcla una pequeña cantidad de agente emulsificantes el cual da como resultado un material líquido denominado emulsión asfáltica.

El cemento asfáltico está conformado por varios elementos químicos entre ellos están los asfáltenos, resinas, aromáticos y saturados, y cada uno de ellos proporcionan características importantes a este material. Los asfáltenos brindan dureza, las resinas brindan la capacidad de ligante y los aromáticos y saturados son materiales aceitosos que permiten que el material sea manejable (Aristizabal, 2016).

Conociendo estas tres importantes cualidades del cemento asfáltico se puede decir que la construcción de vías con este material presenta una alta calidad ya que:

- Se genera una buena cohesión entre el cemento y los agregados la cual genere una alta resistencia en espesores pequeños de capa de rodadura.
- El pavimento se vuelve mucho más flexible.
- Es altamente impermeable.
- Presenta una alta resistencia a la disgregación producida por las cargas vehiculares.

El envejecimiento del asfalto es una medida de deterioro que se produce con el tiempo en el cual se produce un endurecimiento del betún alterando el comportamiento reológico del mismo. Puede tener dos comportamientos, aumentar la capacidad de soporte de las cargas o incrementar la resistencia a la deformación del asfalto el mismo que reduce la flexibilidad del pavimento y esto produce que existan más daños por fatiga y que se pierda su potencial de recuperación. Existen tres factores que

contribuyen al envejecimiento del asfalto tales como la pérdida de los componentes aceitosos del betún producido por la absorción, cambios en la composición química producida por la reacción del oxígeno con el aire y debido al endurecimiento estérico que produce efectos en la estructuración molecular.

Es muy importante conocer el comportamiento del asfalto una vez que es envejecido, por lo tanto, en laboratorio se simula el envejecimiento de varias muestras mediante cambios de temperatura, oxidación y radiación ultravioleta para intentar evaluar las propiedades mecánicas y reológicas del asfalto (Fernández, 2015).

El asfalto se caracteriza principalmente de tres maneras las cuales intentan evaluar la consistencia del asfalto a varias temperaturas igualmente evaluar la pureza, seguridad y susceptibilidad al envejecimiento.

- **Por grado de viscosidad:** se basa en obtener la viscosidad del material a 60 °C y con esta viscosidad predeterminada obtener el grado AC correspondiente que servirá para determinar los ensayos especificados que correspondan a cada grado AC(Jorge & Delgado, 2011).
- **Por grado de penetración:** se basa en el ensayo de penetración a 25°C al residuo del TFO en el cual se obtiene un valor que caracteriza el comportamiento del cemento asfáltico en la etapa de envejecimiento y se compara con el valor de penetración en condiciones originales para obtener un valor cuantitativo referente al envejecimiento del asfalto, posteriormente con este valor se obtiene el grado AC correspondiente. Ya que la mayoría de veces se utiliza la caracterización por grado de viscosidad se puede determinar una equivalencia entre el grado de viscosidad y el grado de penetración para poder realizar los ensayos posteriores(Jorge & Delgado, 2011).
- **Por grado de desempeño:** se realiza el envejecimiento del asfalto en horno de película delgada rotacional (RTFO) el cual mide la capacidad reológica del material en diferentes condiciones y

en base a estas condiciones se busca un rango de valores que cumpla los requerimientos que especifica la norma y así obtener su caracterización(Jorge & Delgado, 2011).

2.1.2. Caracterización de los materiales granulares

Un agregado es un material geológico que se utiliza principalmente en el campo de la construcción ya que como su nombre lo indica, sirven para agregar a distintos materiales como el cemento y el agua para formar otro tipo de materiales muy útiles en la construcción tanto de edificaciones como de carreteras. Los agregados más utilizados en la construcción son los que se derivan de las rocas metamórficas, sedimentarias e ígneas y es importante que todos estos agregados conserven las características físicas y químicas de su roca madre (Vizcardo Otero & Trinidad Santos , 2014).

- **Rocas ígneas:** son aquellas rocas que se forman cuando un material rocoso, caliente y móvil como el magma se solidifica, se produce una cristalización por el enfriamiento y unión de las partículas que lo conforman. Existe dos tipos de rocas ígneas; las intrusivas que son producidas a altas profundidades (interior de la corteza terrestre), y las extrusivas que se producen a una profundidad baja o en la superficie (Servicio Geologico Mexicano , 2017).
- **Rocas metamórficas:** las rocas metamórficas se originan de rocas preexistentes que ha tenido cambios en su estructura y mineralogía por varios cambios físicos y químicos. Las transformaciones se producen bajo la superficie, las propiedades físicas y químicas de la roca resultante de esta transformación dependerán de los agentes del metamorfismo, de la estructura y composición de su roca original y de la cantidad del tiempo que la roca original tuvo su proceso de metamorfosis (Servicio Geologico Mexicano , 2017).

- **Rocas sedimentarias:** como su nombre lo indica son rocas que se producen por una acumulación de sedimentos que por efectos físicos y químicos producen nuevos materiales. Se forman a orillas del río, en valles, lagos, etc. y cubren el 75% de la superficie terrestre formando estratos o capas de este material (EcuRed, 2018).

El material granular en una mezcla asfáltica representa aproximadamente un 90% en peso de toda la mezcla asfáltica por lo tanto es importante conocer las características físicas y químicas de este tipo de material ya que tendrán un papel importante en la capacidad portante de un pavimento. Los agregados utilizados en la generación de mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo a su fuente de origen y son:

- **Agregados naturales:** son aquellos agregados que no se le someten a un proceso para poder utilizarlos. Están formados de partículas que son producidas por la erosión y la degradación. De estas se obtienen las gravas y las arenas crudas sin embargo estas no se utilizan en la elaboración de las mezclas asfálticas porque son muy grandes y presentan gran cantidad de material fino.
- **Agregados procesados:** En este tipo de agregados se encuentran las gravas y las arenas procesadas las cuales serán necesarias para realizar la mezcla asfáltica las cuales se detallarán posteriormente. Se obtienen mediante el triturado y tamizado de las rocas obtenidas de forma natural con el fin de modificarlas para que cumpla con una granulometría específica para la elaboración de las mezclas asfálticas.
- **Agregados sintéticos:** son aquellos que no existe en la naturaleza, sino que se originan de un proceso físico y químico de otros materiales como por ejemplo el vidrio volcánico, escoria, tierra procesada, etc. Este tipo de agregados tienen una alta resistencia al desgaste. En el campo de la construcción de pavimentos este tipo de materiales son nuevos en su uso y se los aplica principalmente en superficies que necesiten una alta resistencia al deslizamiento.

2.1.2.1. Agregado grueso.

El agregado grueso consiste en partículas gruesas que se encuentran retenidas en el tamiz número 4 (4.76mm) que se obtienen en minas o canteras y están formados por rocas y gravas trituradas. Las rocas donde proceden los agregados gruesos deben cumplir con requisitos de calidad, ser sanas y durables. Los agregados gruesos obtenidos en canteras deben presentar partículas limpias y resistentes con una textura adecuada y sin material vegetal con el fin de garantizar calidad y un buen desempeño (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2002).

El agregado grueso presenta un papel muy importante en las mezclas asfálticas sobre todo en la trabajabilidad ya que el exceso de este material causa problemas a la hora de la compactación en la obra. Igualmente, si existe un desbalance entre el agregado grueso y el agregado fino (más agregado grueso que fino) se producen una gran cantidad de vacíos que pueden causar problemas en el desempeño del pavimento.

2.1.2.2. Agregado fino.

Son materiales que están formados por arena ya sea natural, triturada o una mezcla de los dos. Al igual que los agregados gruesos deben proceder de rocas sanas y limpias con el fin de brindar una alta calidad a la mezcla asfáltica. El agregado fino se define como todo el material que pasa del tamiz numero 4 (4,76mm) y que es retenido en el tamiz No. 200 (75mm).

Así como el agregado grueso, el agregado fino presenta varias ventajas en una mezcla asfáltica, sus partículas finas rellenan los espacios vacíos entre los agregados gruesos. Sin embargo, el exceso de material fino puede ser perjudicial en la compactación porque reduce su resistencia. Por lo tanto, considerando las ventajas y desventajas de los distintos materiales que conforman una mezcla asfáltica es importante mantener una proporción adecuada para asegurar una estructura de pavimento de calidad.

2.1.2.3. *Piedra caliza.*

La piedra caliza es una roca sedimentaria que está formada de carbonato de sodio e impurezas, presenta varias características físicas y químicas que le permite a este material ser utilizado en el ámbito de la construcción esencialmente en la generación de cal para la producción de cemento, también se utiliza bastante en el diseño de chimeneas o baldosas por su alta resistencia y durabilidad. Al igual que los agregados pétreos, la piedra caliza puede ser natural, procesada o artificial, por lo tanto, se los pueden encontrar de distintos tamaños de acuerdo a su utilización.

2.2. Mezclas asfálticas

Una mezcla asfáltica está conformada por agregado grueso, fino y un material ligante que se mezclan en laboratorios fijos o móviles y luego se le transporta al lugar de la obra para extenderlas y compactarlas. Los agregados de la mezcla y sus proporciones juegan un papel importante en la calidad y el rendimiento de la capa asfáltica una vez utilizada. Las mezclas asfálticas se utilizan principalmente en la construcción de capas de rodadura y en capas interiores que facilitan la circulación de vehículos de manera segura y cómoda y que generan una alta capacidad a las cargas de tráfico. Las mezclas asfálticas deben cumplir con varias características para que se considere que la vía construida con la misma es de buena calidad:

- Debe presentar una alta resistencia a las cargas vehiculares.
- Ser fácilmente trabajable en el momento de su colocación y compactación.
- Ser impermeable para que cuando haya precipitaciones o inundaciones el pavimento no presenten problemas por los agentes atmosféricos.

- La mezcla debe presentar características de durabilidad es decir que presente una alta resistencia a varios agentes externos que desgastan el pavimento.

Las mezclas asfálticas se dividen en varios tipos de acuerdo a varios factores:

- **Granulometría:** dependen de la distribución de diferentes tamaños de los agregados y se clasifican en mezclas continuas donde hay una alta cantidad de diferentes tamaños en la mezcla, y mezclas discontinuas donde la cantidad de diferentes tamaños de agregados es limitada.
- **Estructura de los agregados:** en esta clasificación se encuentran las mezclas con esqueleto mineral cuya resistencia se obtiene por el rozamiento interno de los agregados, y las mezclas sin esqueleto mineral donde la resistencia se produce por la cohesión de la mezcla.
- **Tamaño máximo de los agregados:** depende del tamaño de los materiales que conforman en el agregado y se clasifica en mezclas gruesas donde el tamaño máximo de los agregados es mayor a 10mm, y las mezclas finas que están formado por materiales finos como polvo mineral y ligantes asfálticos.
- **Porcentaje de vacíos:** se clasifican en mezclas cerradas donde el porcentaje de vacíos es menor al 6%, mezclas semicerradas donde el porcentaje de vacío de la mezcla está en un rango entre 6 al 10%, mezclas abiertas donde la proporción de vacíos es mayor al 12% y mezclas porosas cuyo porcentaje es superior al 20%. El porcentaje de vacíos es un factor importante para impedir que ocurran deformaciones a largo plazo por causa de las cargas vehiculares.
- **Temperatura de mezcla:** existen dos importantes clasificaciones por la temperatura en la que se mezcla y son:

Mezclas en frío: son mezclas que están formadas por un ligante que usualmente es la emulsión asfáltica y por los agregados pétreos que son mezclados y colocados en obra a temperatura ambiente. Las obras construidas con mezclas asfálticas en frío presentan una alta trabajabilidad ya que después de su fabricación, la emulsión sigue estando con una viscosidad baja por su contenido de solventes por lo tanto esta mezcla puede ser almacenada, transportada por un largo periodo de tiempo sin que ocurra algún cambio en su composición.

Mezclas en caliente: son aquellas que se forman por los agregados, cemento asfáltico y por varios aditivos que permiten que la mezcla quede totalmente cubierta por el ligante. Su característica es que el cemento asfáltico se encuentra a elevadas temperaturas, aproximadamente a 150°C al igual que los agregados para que cuando el cemento asfáltico entre en contacto con los agregados al momento de la mezcla, este mantenga su temperatura y no se enfríe. A diferencia de las mezclas en frío, esta no puede ser almacenada por mucho tiempo ya que el cemento asfáltico, a temperatura ambiente, presenta una textura semisólida rápidamente.

2.2.1. Diseño de mezclas en caliente

Como se mencionó anteriormente una mezcla asfáltica en caliente está formada por los agregados pétreos y el cemento asfáltico, los mismo que son mezclados en una proporción exacta de tal manera que brinden alta capacidad a la estructura asfáltica. Se realiza un análisis a las mezclas en caliente basándose en cuatro características importantes; densidad de la mezcla, vacíos al aire, vacíos en el agregado mineral y el contenido óptimo de asfalto.

- **Densidad de la mezcla:** también denominada peso unitario, es un factor importante al momento de la construcción ya que se necesita tener una alta densidad en la construcción final del pavimento para asegurar la duración y el rendimiento.

- **Vacíos de aire:** son espacios de aire que se encuentran en la mezcla final compactada. Es necesario dejar ciertos espacios de aire luego de la compactación para dar lugar a una compactación adicional producida por las cargas de tráfico. Los vacíos de aire se relacionan con la durabilidad del pavimento ya que si existen muchos vacíos, el agua, aire u otras sustancias pueden ingresar en esos espacios y deteriorar al pavimento, en el otro caso que los vacíos sean muy pequeños va a producir exudación del asfalto.
- **Vacíos de agregado mineral:** se lo define como los espacios de aire que se encuentran entre los agregados incluyendo los espacios llenos de asfalto. Existen valores mínimos de los vacíos de agregado mineral que dependen del tamaño máximo del agregado ya que mientras más gruesa sea la película de ligante asfáltico que cubre los agregados de la mezcla, mayor durabilidad tendrá la mezcla.
- **Contenido óptimo de asfalto:** depende principalmente de las características de los agregados como su granulometría y absorción, entre más finos exista en la mezcla se necesitará de más asfalto para cubrir todo el agregado, caso contrario si es que se utilizaría material grueso ya que el área superficial sería menor y la cantidad de asfalto disminuiría. En el caso de la absorción de los agregados se debe poner un contenido de asfalto adecuado para que a pesar que haya absorción, el cemento asfáltico sea capaz de cubrir todos los agregados de la mezcla.

2.2.2. Métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente.

Existen varios métodos para el diseño de mezclas asfálticas en caliente que se han ido debilitando o fortaleciendo al paso de los años, sin embargo, en la actualidad se utilizan tres métodos importantes:

- **Método Marshall:** este método es el más utilizado en la actualidad en varios laboratorios ya que se basa en la densidad/vacíos de la mezcla asfáltica, este análisis garantiza que los volúmenes de

cada material que conforma la mezcla se encuentran dentro de los rangos establecidos para asegurar un pavimento durable. Este método tiene una desventaja, la densidad que tiene la mezcla ya puesta en obra no es la misma que se simula de la compactación de la mezcla en laboratorio (Universidad de las Americas Puebla, 2015).

- **Método Hveen:** este método se basa en el análisis de densidad, estabilidad y resistencia al igual que el método Marshall, sin embargo, este método no es muy utilizado por su alto costo en el equipamiento necesario para los ensayos (Universidad de las Americas Puebla, 2015).
- **Método SUPERPAVE:** es el método más actualizado que existe para el diseño de mezclas asfálticas en caliente ya que presenta especificaciones actualizadas de los materiales e incluso actualización de equipos y métodos de ensayo (Universidad de las Americas Puebla, 2015).

2.2.3. Mezclas asfálticas modificadas.

En este trabajo se realizará una mezcla asfáltica en caliente reemplazando el agregado grueso por la piedra caliza, en el caso de las mezclas convencionales que se realizarán en esta investigación, estarán formadas por tres tipo de agregados; agregado grueso, intermedio y fino, donde el agregado grueso es aquel que es retenido en el tamiz 3/8" (9.52mm), el intermedio es aquel que pasa el tamiz 3/8" (9.52mm) y es retenido en el No. 4 (4.76mm) y el fino consta de todo el material que pasa el No. 4 y se retiene en el tamiz No.200 (0.075mm).

Por lo tanto, para las muestras modificadas se reemplazará todos los materiales retenidos en el tamiz 3/8" (agregados gruesos) por piedra caliza con partículas que se retienen igualmente en el tamiz 3/8".

3. CAPITULO III: ENSAYOS DEL CEMENTO ASFALTICO

Para la aceptación de los cementos asfálticos se puede considerar por: el grado de viscosidad, por el grado de desempeño y por el grado de penetración como se mencionó anteriormente. Para la determinación del cemento asfáltico se usará por grado de viscosidad el cual se utiliza en el país utilizando la norma NTE INEN 2515 enmienda 1.

Se escogerá la tabla 5 de la norma INEN 2515 ya que este cumple con los requisitos de penetración de 220 dmm a 40 dmm siendo estos menos susceptibles a las temperaturas específicas en la tabla 4 de la norma INEN 2515, es decir, los requisitos que cumplen de la tabla 5 también cumplen en la tabla 4 con asfaltos del mismo tipo. Además, se usará para el resto de ensayos la tabla 7 de la misma norma donde muestra todos los datos que se deben cumplir.

Ensayo	Unidad	AC-2.5		AC-5		AC-10		AC-20		AC-30		AC-40		Norma de Ensayo
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
Viscosidad absoluta a 60 °C	Pa s ⁽⁷⁾	25 ± 5		50 ± 10		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		400 ± 80		ASTM D2171
Viscosidad cinemática a 135 °C.	mm ² s ⁻¹⁽⁸⁾	125	--	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTM D2170
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s	dmm	220	--	140	--	80	--	60	--	50	1-	40	--	NTE INEN 917
Punto de inflamación	°C	163	--	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w Solubilidad en tricloroetileno	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Pruebas realizadas al residuo del ensayo de película delgada al horno														ASTM D1754
Viscosidad absoluta a 60°C	Pa s ⁽⁷⁾	--	125	--	250	--	500	--	1 000	--	1 500	--	2 000	ASTM D2171
Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min	cm	100 ⁽⁹⁾	--	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
⁽⁷⁾ 1 Pa s (Pascal segundo) = 10 P (Poise). ⁽⁸⁾ Ver NTE INEN 53 ⁽⁹⁾ Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5cm/min.														

Tabla 3.1. Requisitos de Cementos Asfálticos de viscosidad a 60 °C a base de asfalto original de 220 dm a 40 dmm de penetración.

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	
Viscosidad absoluta, 60 °C	Pa s	60 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno, %	%	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	99,0	--	NTE INEN 915
Gravedad específica 25 °C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de Penetración ^a		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1 200	--	2 000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1,5	--	1,0	--	1,0	--	1,0	--	1,0	ASTMD 2872
Ductilidad ^b , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
^a Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min. ^b Índice de penetración = $\frac{1952 - 500 \log pen - 20 SP}{50 \log pen - SP - 126}$ donde: pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36 ^c Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

Tabla 3.2. Requisitos de Cementos Asfáltico viscosidad a 60 C a base de asfalto original.

3.1. Ensayo de penetración de materiales bituminosos (ASTM D-5)

Este método sirve como cuantificación de la consistencia del asfalto a 25 °C, además es de gran ayuda ya que con este se podrá caracterizar al asfalto para tener en cuenta si este es un asfalto elástico o es rígido, lo que daría una idea de cómo se va a comportar el material. Los asfaltos que presentan una consistencia rígida, tendrán menor deformación al aplicarse la carga (aguja normalizada) que los asfaltos que son más blandos.

Es importante que no se tenga ningún tipo de fricción al momento de realizar el ensayo además la superficie del material debe ser lisa para que la aguja sea apoyada de manera correcta y no se dé una deformación anterior y también se debe tomar en cuenta que la aguja debe rozar ya que tampoco debe estar arriba de la superficie del material.

3.1.1. Terminología.

Penetración. - (ASTM D-5, 2015) afirma: "Consistencia de un material bituminoso expresado como la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente en una muestra del material, bajo condiciones conocidas de carga, tiempo y temperatura" (p 1).

3.1.2. Resultados del ensayo de Penetración.

3.1.2.1. Información general del ensayo.

Datos	Valores
Temperatura de ensayo (°C)	25,00
Carga (g)	100,01
Tiempo de carga (seg)	5,00

Tabla 3.3. Información general del ensayo de penetración.

3.1.2.2. Valores de penetración de la muestra.

Punto	1	2	3	4	5	6	Promedio
Penetración (0.1 mm)	79	79	80	80	79	76	78.83

Tabla 3.4. Valores de penetración de la muestra.

3.1.2.3. Especificación del Producto.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 5, Grado AC-20	mínimo	60
Resultado	Cumple	

Tabla 3.5. Especificación del Ensayo de penetración.

3.2. Ensayo del horno de película delgada rodante (ASTM D-2872).

El ensayo del horno de película delgada rodante o RTFO como son sus siglas en inglés, nos ayuda a evaluar la susceptibilidad al envejecimiento que se da en el asfalto cuando este está siendo mezclado lo que va a afectar su vida útil. Lo que trata de simular es envejecer al asfalto para posteriormente ser utilizado para múltiples ensayos.

Lo que trata de medir el ensayo es la variación de masa que es una medida de volatilidad que se da en el asfalto sea por ganancia o por pérdida respecto a su masa original previo a que este es calentado. Si el resultado es de signo negativo quiere decir que se generó una pérdida de masa mientras que se da un aumento de masa cuando este es de sentido positivo.

3.2.1. Resultados del ensayo RTFO.

3.2.1.1. Valores de RTFO.

Botella	1	2
Masa de botella + asfalto antes (g)	198,275	206,372
Masa de botella + asfalto después (g)	198,269	206,371
Cambio de masa (%)	-0,003	0,001
Cambio de masa promedio (%)	-0,002	

Tabla 3.6. Valores de RTFO.

3.2.1.2. Especificación del Producto.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20 RTFO	máximo	1 %
Resultado	Cumple	

Tabla 3.7. Especificación del Ensayo RTFO.

3.3. Ensayo de gravedad especifica de materiales bituminosos (ASTM D-70).

Gravedad especifica o también conocida como densidad relativa establece la densidad de los asfaltos usando el picnómetro a la temperatura que se requiere, además nos ayuda a identificar la calidad que tiene el material junto a su origen ya que nos da la relación del peso por unidad de volumen.

Es importante que la precisión sea de 0.001 gramos y que se deba sumergir el picnómetro durante 30 minutos antes de pesar. Se usa el método del picnómetro cuando se tienen bitúmenes que son semisólidos y para emulsiones ya que se necesita de otras ecuaciones y de otro proceso cuando tenemos materiales muy viscosos.

3.3.1. Terminología.

Gravedad especifica. - (ASTM D70-03, 2003) afirma: “la relación de la masa de un determinado volumen de un material a la masa del mismo volumen de agua, a la misma temperatura” (p 1).

3.3.2. Resultados del ensayo de Penetración.

3.3.2.1. Información general del ensayo.

Datos	Valores
Temperatura de ensayo (°C)	25,00

Tabla 3.8. Información general del ensayo de penetración.

3.3.2.2. Valores de gravedad específica de la muestra.

$$\text{Densidad Relativa de la muestra} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$$

*Densidad de la muestra = Densidad Relativa de la muestra * Densidad del agua*

Datos	Valores
A: Masa del picnómetro (más tapa)	32,784
B: Masa del picnómetro lleno de agua	61,992
C: Masa del picnómetro parcialmente lleno con asfalto	54,620
D: Masa del picnómetro más asfalto y más agua	62,257
Densidad relativa de la muestra	1,012
Densidad del agua a la temperatura de ensayo (kg/m³)	997
Densidad de la muestra (kg/m³)	1009,248

Tabla 3.9. Valores de penetración de la muestra.

3.4. Ensayo de punto de chispa y llama con el equipo de copa abierta Cleveland (ASTM D-92)

Lo que trata de determinar el ensayo de chispa y llama es encontrar los puntos de inflamación y de combustión esto se debe a que en obra se corren peligros debido a que se puede producir un incendio, es por eso que el punto de inflamación indica la temperatura crítica para saber que se puede generar riesgo en los alrededores.

Se debe tomar en cuenta que al momento de realizar los ensayos no debe existir corrientes de aire ni movimientos que sean bruscos ya que puede generarse otros datos, además que debe ser un lugar oscuro para que se puede apreciar y distinguir de mejor manera los puntos de inflamación y de combustión.

3.4.1. Terminología.

Inflamación. - (Salvador & Salvador) afirma: “temperatura a la que se producen los destellos por inflamación de los valores desprendidos por el material bituminoso”.

Combustión. - (Salvador & Salvador) afirma: “temperatura a la que se produce la combustión de estos vapores, por lo menos durante 5 segundos”).

3.4.2. Resultados del ensayo de chispa y llama.

3.4.2.1. Valores de la muestra.

$$\text{Punto de chispa y llama corregido} = \text{Punto de chispa y llama} + 0.033 * (760 - K)$$

Datos	Valores
Punto de chispa (°C)	267,8
Punto de llama (°C)	316,1
K: Presión barométrica (mm Hg)	548,3
Punto de chispa corregido (°C)	275
Punto de llama corregido (°C)	323

Tabla 3.10. Valores de chispa y llama de la muestra.

3.4.2.2. Especificación del Producto.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20	mínimo	232
Resultado	Cumple	

Tabla 3.11. Especificación del Ensayo de chispa y llama.

3.5. Ensayo de punto de reblandecimiento de materiales bituminosos (ASTM D 36).

Este método mide de una manera indirecta la consistencia que puede tener el asfalto es decir el punto de ablandamiento como menciona el ensayo el cual debe estar en el rango de 30 a 200 °C. esto se debe a que el asfalto al ser calentado de manera gradual de un estado el cual es poco fluido a un estado menos viscoso.

Es ensayo se realiza mediante el ensayo de anillo y bola pese a que existen otros ensayos, y se debe realizar con agua destilada ya que pueden presentarse burbujas de aire o con glicerina, esto va a depender si el material bituminoso tiene el punto de reblandecimiento inferior o superior a 80 °C, siendo agua si es menor a 80 °C y glicerina para el caso de que este sea mayor a 80 °C.

3.5.1. Terminología.

Punto de ablandamiento. - (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011) afirma: “menor temperatura a la que una muestra, suspendida en un anillo horizontal de dimensiones especificadas, es forzada a caer 25 mm por el peso de una bola de acero especificada, cuando la muestra se calienta mediante incrementos a una velocidad prescrita”.

3.5.2. Resultados del ensayo del punto de reblandecimiento.

3.5.2.1. Información general del ensayo.

Datos	
Líquido usado en el baño	Agua destilada

Tabla 3.12. Información general del ensayo de punto de reblandecimiento.

3.5.2.2. Valores del punto de reblandecimiento de la muestra.

Punto	1	2	Promedio
Punto de ablandamiento (C)	51,10	51,20	51,15

Tabla 3.13. Valores del punto de ablandamiento de la muestra.

3.6. Índice de penetración de materiales bituminosos (D-3381).

Debido a que el asfalto es un material termoplástico ya que se comporta como líquido viscoso cuando está a altas temperaturas, como sólidos a bajas temperaturas y como material viscoelástico cuando está sometido a temperaturas intermedias, se le da un criterio a la medida de susceptibilidad, influenciado en los valores de penetración y del punto de ablandamiento.

El fundamento del índice de penetración se basa en decir que; se tiene una relación lineal entre el logaritmo de penetración y la temperatura, esto mediante una pendiente que se ve relacionada por la susceptibilidad térmica que tiene el asfalto. Relacionando esto se obtuvo que los asfaltos tienen la temperatura correspondiente al punto de reblandecimiento cuando se tiene una penetración de 800¹.

3.6.1. Resultados del Índice de Penetración.

3.6.1.1. Información general del ensayo.

$$I.P. = \left[\frac{1952 - 500 * \log Penetracion - 20 * Punto de Ablandamiento}{50 * \log Penetracion - Punto de Ablandamiento - 120} \right]$$

¹ (Subiaga, 2005)

Datos	Valores
Penetración a 25 °C, 100g, 5seg	79
Punto de Ablandamiento (°C)	51.15
Índice de Penetración	0.26

Tabla 3.1124. Información general del índice de penetración.

3.6.1.2. Especificación del Producto.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20	mínimo	-1,5 %	máximo	1 %
Resultado	Cumple			

Tabla 13.15. Especificación del Índice de Penetración.

3.7. Ensayo de ductilidad de materiales bituminosos RTFO (ASTM D-113).

Lo que trata de realizar el ensayo es medir la elongación que se genera en el asfalto obtenido por la destilación del crudo el cual es muy grande que en las rotulas donde el asfalto se presenta como ligante se produce antes por fallo de ductilidad². Los asfaltos dúctiles tienen mejores propiedades aglomerantes pero los que tienen gran ductilidad puede tener grandes deformaciones debido a grandes temperaturas.

Se presenta una gran discusión en el ensayo ya que este va a depender de varias características como lo son; la consistencia, reología, cohesión, entre otras. Pero no mide ninguna de estas propiedades, sino la ductilidad. Este ensayo se realiza de igual manera para el cemento asfáltico y el residuo del horno de película delgada, en este caso se realizará para el ensayo de RTFO, siendo el mínimo valor a cumplir de 50.

² (Salvador & Salvador)

Se debe tomar en cuenta si el ensayo es normal o no, ya que va a influir en el valor de la ductilidad. Si se estiro el material de manera que se convierte en un hilo y se rompe cuando el hilo no posee sección transversal es un ensayo normal, pero si llega a tener contacto con el fondo de baño o con la superficie, además que se una con otro hilo, este no es considerado como ensayo normal

3.7.1. Terminología.

Ductilidad. - (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011) afirma: “La ductilidad de un material bituminoso es la longitud, medida en cm., a la cual se alarga (elongación) antes de romperse cuando dos extremos de una briqueta, (...) se traccionan a la velocidad y temperatura especificadas.”.

3.7.2. Resultados del ensayo de ductilidad.

3.7.2.1. Información general del ensayo.

Datos	Valores
Temperatura de ensayo (°C)	25,00
Aditivo para la densidad del agua	No

Tabla 3.16. Información general del ensayo de ductilidad RTFO.

3.7.2.2. Valores de la muestra.

Molde	1	2	3	Promedio
Ductilidad	44	45,5	48,5	46
Ensayo Normal	Si	Si	Si	Normal

Tabla 3.17. Valores de ductilidad de la muestra RTFO.

3.7.2.3. Especificación del Producto.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20 RTFO	mínimo	50
Resultado	No Cumple	

Tabla 3.148. Especificación del Ensayo de ductilidad RTFO.

3.8. Ensayo de viscosidad cinemática a 135 °C (ASTM D-2170)

La viscosidad cinemática a 135 °C es fundamental ya que no solo nos ayuda a comparar con la tabla de la norma NTE INEN 2515, también nos ayuda a determinar cómo se va a comportar el material con respecto a la temperatura, con este valor se garantiza que se den condiciones adecuadas para el asfalto, respecto al transporte y colocación del mismo.

También se utiliza este valor para el cálculo de la temperatura a la que se debe mezclar el asfalto junto con su compactación, analizando con el ensayo de viscosidad absoluta a 60 °C.

3.8.1. Terminología.

Viscosidad Cinemática. - (ASTM, 2010) afirma: " La relación de la viscosidad a la densidad de un líquido. Es una medida de la resistencia al flujo de un líquido bajo gravedad". (p 1).

3.8.2. Resultados del ensayo de Viscosidad Cinemática a 135 C.

3.8.2.1. Información general del ensayo.

Datos	Valores
Temperatura de ensayo (°C)	135,00

Tabla 3.19. Información general del ensayo de Viscosidad cinemática a 135 °C.

3.8.2.2. Valores de la viscosidad cinemática a 135 C.

Viscosidad con viscosímetro rotatorio	382,50
Densidad relativa de la muestra a 25 °C	1,00925
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	405,87

Tabla 3.20. Valores de Viscosidad cinemática de la muestra.

3.8.2.3. Especificación del Producto.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20	mínimo	300
Resultado	Cumple	

Tabla 3.21. Especificación del Ensayo.

3.9. Ensayo de viscosidad a 60 °C al residuo envejecido RTFO (ASTM D 2171).

Con este dato se obtiene información previa del comportamiento que tiene el asfalto antes de la etapa de envejecimiento RTFO. En este ensayo se mide la viscosidad del asfalto acondicionado RTFO para comparar con el valor inicial de viscosidad absoluta del asfalto en condición original. Con el ensayo de viscosidad a 60 °C al residuo envejecido RTFO se obtiene la razón de viscosidades (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011).

Se realizará el ensayo con un viscosímetro de vacío Cannon, presente en el laboratorio en el cual se utilizará el termómetro adyacente al viscosímetro tipo capilar el cual no debe tener una variación mayor a los 0.02 °C, además de utilizarse dos controladores de tiempo con una precisión de 0.1 seg.

El factor de calibración se deberá obtener con los bulbos los cuales son de tipo B C y D, además de dos viscosímetros con tamaño N 100 y 200 con un rango de viscosidades. Para determinar el valor de la Viscosidad (poises) se debe multiplicar el factor dado en laboratorio con el tiempo de flujo expresado en segundos. Se debe siempre mencionar la temperatura del ensayo y el vacío que se está aplicando, todo esto junto con los resultados que se obtuvieron en el ensayo (Ministerio de Obras Publicas y Comunicaciones, 2011).

3.9.1. Resultados del ensayo de Viscosidad a 60 °C RTFO.

3.9.1.1. Información general del ensayo.

$$\text{Viscosidad} = K * \text{tiempo promedio}$$

Datos	
Temperatura de ensayo °C	60.00
Numero de Viscosímetro	200
Código de viscosímetro	K 628

Tabla 3.22. Información general del ensayo de Viscosidad a 60 °C RTFO.

3.9.1.2. Valores de la viscosidad a 60 °C RTFO.

Datos	B	C	D
Tiempo de flujo 1 (seg)	64,12	127,56	191,67
Tiempo de flujo 2 (seg)	64,20	127,91	191,70
Tiempo promedio (seg)	64,16	127,745	191,685
K: Factor de calibración (Pois/seg)	10,82	5,792	3,993
Viscosidad (Pa*seg)	694,21	738,828	765,219

Tabla 3.23. Valores de Viscosidad a 60 C de la muestra.

3.9.1.3. Especificación del Producto.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20	máximo	800
Resultado	Cumple	

Tabla 3.24. Especificación del Ensayo.

3.10. Ensayo de viscosidad a 60 °C al residuo original (ASTM D 2171)

De igual manera al ensayo con el residuo RTFO, se realiza con un viscosímetro Cannon el cual consta de otros valores de constante, pero nos indica las mismas propiedades que presenta el ensayo de viscosidad a 60 °C con residuo RTFO.

3.10.1. Resultados del ensayo de Viscosidad al residuo original.

3.10.1.1. Información general del ensayo.

$$\text{Viscosidad} = K * \text{tiempo promedio}$$

Datos	
Temperatura de ensayo °C	60.00
Numero de Viscosímetro	100
Código de viscosímetro	L 807

Tabla 3.25. Información general del ensayo de Viscosidad al residuo original.

3.10.1.2. Valores de la viscosidad a 60 C.

Datos	B	C	D
Tiempo de flujo 1 (seg)	88,72	183,68	278,28
Tiempo de flujo 2 (seg)	90,87	183,92	278,62
Tiempo promedio (seg)	89,80	183,80	278,45
K: Factor de calibración (Pois/seg)	3,180	1,601	1,066
Viscosidad (Pa*seg)	285,56	294,264	296,846

Tabla 3.26. Valores de Viscosidad a 60 °C de la muestra.

3.10.1.3. Especificación del Producto.

NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20	mínimo	160	máximo	240
Resultado	No Cumple			

Tabla 3.27. Especificación del Ensayo.

3.11. Carta de viscosidad (ASTM D-2493).

La carta de viscosidad no es mas que una carta como su nombre lo indica en el cual se determina la temperatura de compactacion y la de mezclado para que se realice la mezcla asfaltica en obra, esta carta se debe determinar con dos puntos tomados por el ensayo de viscosidad a varias temperaturas dandonos un valor minimo y un maximo.

3.11.1. Resultados De la carta de viscosidad.

3.11.1.1. Información general del ensayo.

Datos		
Punto	Temperatura de ensayo °C	Viscosidad
1	110	1,66
2	170	0,085

Tabla 3.28. Información general de la carta de viscosidad.

3.11.1.2. Valores de la carta de viscosidad.

Datos	Mínimo	Máximo
Mezclado (°C)	153,9	158,3
Compactación (°C)	143,8	148,0

Tabla 3.29. Valores de la carta de viscosidad.

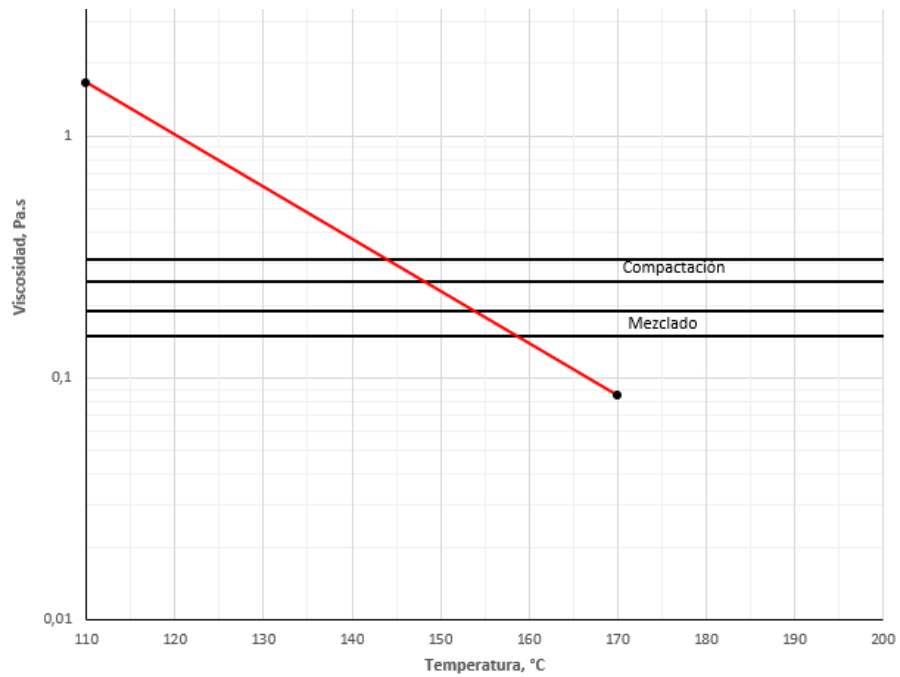


Ilustración 3.1. Carta de Viscosidad.

4. CAPITULO 4: ENSAYO DE LOS AGREGADOS

Los agregados que forman una mezcla asfáltica deben cumplir ciertas especificaciones para que la mezcla asfáltica presente una alta calidad durante toda su vida útil. Por lo tanto, para comprobar que los agregados pétreos que conforman la mezcla asfáltica presenten características físicas y químicas necesarias para garantizar la durabilidad y resistencia en la estructura de pavimento, se debe realizar varios ensayos en laboratorio, los mismos que son especificados en diferentes normas de la construcción.

4.1 Granulometría (ASTM D422).

La granulometría es un indicador de la distribución de las partículas de los agregados por un análisis de tamices compuestos por una malla de alambre que tienen aberturas cuadradas, el tamaño de las aberturas varía de acuerdo al tamaño de los agregados.

3-in. (75-mm)	No. 16 (1.18-mm)
1½-in. (37.5-mm)	No. 30 (600-µm)
¾-in. (19.0-mm)	No. 50 (300-µm)
⅜-in. (9.5-mm)	No. 100 (150-µm)
No. 4 (4.75-mm)	No. 200 (75-µm)
No. 8 (2.36-mm)	

Tabla 4.1. Abertura de tamices

4.1.1. Granulometría de agregados gruesos y piedra caliza.

El ensayo consiste en colocar el agregado en la serie de tamices representados en la tabla 4.1 e inmediatamente realizar movimientos circulares para garantizar que todas las partículas pasen por cada uno de los tamices. Es importante que antes del ensayo se haga un cuarteo de los agregados es decir colocar la muestra en un separador para obtener una muestra que abarque la mayor parte de las partículas. Los resultados del ensayo se expresan como porcentaje acumulado de la cantidad de material que pasa en cada uno de los tamices utilizados (Maila, 2013).

4.1.1.1. Resultados del ensayo de granulometría de agregados grueso.

Granulometría agregado grueso					
Malla	Abertura	Peso	Peso retenido	% de peso retenido	% de peso pasante
1 1/2"	38,1	567	567	3,38	96,62
1"	25,4	9469	10036	59,82	40,18
3/4"	19	6282	16318	97,26	2,74
1/2"	12,7	274	16592	98,90	1,10
3/8"	9,51	57	16649	99,24	0,76
No.4	4,76	0	16649	99,24	0,76
No.8	2,36	0	16649	99,24	0,76
No.16	1,18	0	16649	99,24	0,76
No.30	0,6	0	16649	99,24	0,76
No.50	0,3	0	16649	99,24	0,76
No.10	0,15	0	16649	99,24	0,76
No.20	0,075	0	16649	99,24	0,76
PAN	0	128	16777	100,00	0,00
Masa inicial		16777			

Tabla 4.2. Valores de granulometría del agregado grueso

Granulometría agregado intermedio					
Malla	Abertura (mm)	Peso retenido parcial (g)	Peso retenido acumulado (g)	% de peso retenido acumulado (g)	% de peso pasante acumulado (g)
1 1/2"	38,1	0	0	0,00	100,00
1"	25,4	0	0	0,00	100,00
3/4"	19	0	0	0,00	100,00
1/2"	12,7	13	13	0,08	99,92
3/8"	9,51	1281	1294	7,54	92,46
No.4	4,76	15128	16422	95,69	4,31
No.8	2,36	0	16422	95,69	4,31
No.16	1,18	0	16422	95,69	4,31
No.30	0,6	0	16422	95,69	4,31
No.50	0,3	0	16422	95,69	4,31
No.100	0,15	0	16422	95,69	4,31
No.200	0,075	0	16422	95,69	4,31
PAN	0	739	17161	100,00	0,00
Masa inicial		17161			

Tabla 4.3. Valores de granulometría del agregado intermedio

Granulometría piedra Caliza					
Malla	Abertura	Peso retenido	Peso retenido	% de peso retenido	% de peso pasante
1 1/2"	38,1	653	653	1,52	98,48
1"	25,4	6623	7276	16,91	83,09
3/4"	19	6264	13540	31,46	68,54
1/2"	12,7	6126	19666	45,69	54,31
3/8"	9,51	2572	22238	51,67	48,33
No.4	4,76	3900	26138	60,73	39,27
No.8	2,36	0	26138	60,73	39,27
No.16	1,18	0	26138	60,73	39,27
No.30	0,6	0	26138	60,73	39,27
No.50	0,3	0	26138	60,73	39,27
No.100	0,15	0	26138	60,73	39,27
No.200	0,075	0	26138	60,73	39,27
PAN	0	16902	43040	100,00	0,00
Masa inicial		43040			

Tabla 4.4. Valores de granulometría de la piedra caliza

Se considera que los agregados gruesos se dividen en tres grupos de acuerdo a su granulometría:

- Agregados tipo A: son aquellos materiales donde sus partículas se caracterizan por ser trituradas y están formadas por piedra, grava, arena, etc.
- Agregados tipo B: materiales donde el 50% de las partículas que forman el agregado grueso están formadas por materiales triturados y los demás materiales son obtenidos de depósitos naturales.

- Agregados tipo C: aquellos materiales donde las partículas provienen de depósitos naturales o por trituración según las disponibilidades de la zona.

Para obtener el tipo de agregado se compara la granulometría obtenida de los agregados gruesos en la tabla 4.2 y 4.4 con los siguientes requerimientos que se especifican en la MOP-001F-2002. Tabla 404-5.1

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través los tamices de malla cuadrada		
	A	B	C
2" (50.8 mm.)	100	—	—
1 1/2" (38.1 mm.)	90 - 100	100	—
1" (25.4 mm.)	—	90 - 100	100
3/4" (19.0 mm.)	56 - 80	—	90 - 100
1/2" (12.5 mm.)	—	56 - 80	—
3/8" (9.5 mm.)	—	—	56 - 80
Nº 4 (4.75 mm.)	23 - 53	29 - 59	35 - 65
Nº 8 (2.36 mm.)	15 - 41	19 - 45	23 - 49
Nº 50 (0.30 mm.)	4 - 16	5 - 17	5 - 19
Nº 200 (0.075 mm.)	0 - 6	1 - 7	2 - 8

Tabla 4.5. Especificaciones de granulometría para agregado grueso

Se puede concluir que el agregado grueso que se ha utilizado para el ensayo, comparando con la tabla 4.5, corresponde a un agregado tipo B, mientras que la piedra caliza se define como un agregado tipo A.

4.1.2. Granulometría de agregados finos

El proceso del ensayo para agregados finos es exactamente el mismo, lo único que va a variar son los tamices donde se ensayan. En el agregado grueso se utilizaba todos los tamices para no desperdiciar material fino, sin embargo, en los agregados finos se utilizan tamices desde el

No. 8 (2.36 mm) hasta el No.200 (0.075mm). Los resultados se obtienen de la misma manera que en el ensayo del agregado grueso.

Granulometría agregado fino					
Malla	Abertura (mm)	Peso retenido parcial (g)	Peso retenido acumulado (g)	% de peso retenido acumulado (g)	% de peso pasante acumulado (g)
1 1/2"	38,1	0	0	0,00	100,00
1"	25,4	0	0	0,00	100,00
3/4"	19	0	0	0,00	100,00
1/2"	12,7	0	0	0,00	100,00
3/8"	9,51	0	0	0,00	100,00
No.4	4,76	55,3	55,3	5,54	94,46
No.8	2,36	236,3	291,6	29,22	70,78
No.16	1,18	185,6	477,2	47,82	52,18
No.30	0,6	152,5	629,7	63,10	36,90
No.50	0,3	171,8	801,5	80,31	19,69
No.100	0,15	174,2	975,7	97,77	2,23
No.200	0,075	0,1	975,8	97,78	2,22
PAN	0	22,2	998	100,00	0,00
Masa inicial		998			

Tabla 4.6. Granulometría del agregado fino.

4.2. Abrasión por la máquina de los ángeles (ASTM C 131).

Este ensayo consiste en medir la resistencia al desgaste de los agregados gruesos empleando la máquina de los ángeles. El ensayo de abrasión de los agregados gruesos es importante realizarlo ya que está relacionada con la resistencia y durabilidad de las estructuras. Su proceso consiste en colocar la muestra de agregado grueso en un tambor giratorio las cuales miden su porcentaje de desgaste mediante unas bolas de acero que giran dentro del tambor a 500 revoluciones.

El número de bolas de acero y la cantidad de muestra que se coloca en el tambor giratorio dependerá del tipo de agregado que se ha determinado en la sección 4.1.1. Una vez que hayan pasado las 500 revoluciones se tamiza en el mismo tamiz donde se retuvo el material inicial y se pesa para así obtener el porcentaje de desgaste de la muestra.

4.2.1. Resultados del ensayo de abrasión.

4.2.1.1. Valores de muestra de agregado grueso y piedra caliza

Abrasión		
Muestra N	1	2
Descripción	Grueso	Caliza
Tipo de Gradación	B	A
N de Revoluciones	500	500
Masa Inicial (g)	5000	5000
Peso Tamiz 12 (g)	609	609
Masa Retenida N12 (g)	4590	2764
Porcentaje de Desgaste (%)	8,2	44,72

Tabla 4.7. Valores de abrasión para el agregado grueso y piedra caliza

4.2.1.2. Especificaciones del producto

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón asfáltico.	máximo	40%
Resultado para piedra caliza	No Cumple	
Resultado para el agregado grueso	Cumple	

Tabla 4.8. Especificaciones del Ensayo de abrasión.

4.3. Equivalente de arena (ASTM D-2419).

Como se mencionó anteriormente, el agregado fino está conformado por todo tipo de material por lo tanto este ensayo da como resultado un indicador de las proporciones de limos, arcillas, agregados finos y polvos granulares que existen en materiales que pasan el tamiz No.4 (4.75mm). Sirve principalmente para conocer la cantidad necesaria de agregado fino y sus cambios de calidad y resistencia en la construcción. El proceso consiste en colocar una cantidad de agregado fino con solución flocuante en una probeta, esta se la agita y se logra que la arcilla se desprenda de las partículas de arena las mismas que tiempo después se sedimentan y permiten diferenciar una capa de arena sedimentada y una capa de arcilla en suspensión.

4.3.1. Resultados del ensayo de equivalente de arena.

4.3.1.1. Valores de la muestra.

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{\text{Lectura inicial}}{\text{Lectura final}} * 100$$

Equivalente de Arena		
Muestra N	1	2
Lec Inicial	4,3	4,2
Lec Final	4,65	4,5
Eq. Arena	92,5	93,3
Eq. Arena promedio	92,9 %	

Tabla 4.9: Valores de equivalente de arena.

4.3.1.2. Especificación del Producto

Las tolerancias del ensayo dependen de la siguiente tabla obtenida en la MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón asfáltico.

	Equivalente de Arena	
	Tráfico Liviano y Mediano	Tráfico Pesado
Base	35	40
Capa de Rodadura	45	50

Tabla 4.10. Especificaciones para el Ensayo de equivalente de arena.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón	Mínimo para Tráfico Muy Pesado	50%
Resultado para agregado fino	cumple	

Tabla 4.11. Especificación del ensayo.

4.4. Gravedad específica y absorción de los agregados.

4.4.1. Terminología

Gravedad específica. - Según (ASTM C125-07, 2018):“La relación entre la masa de un volumen de material a una temperatura dada, y la masa del mismo volumen de agua destilada a dicha temperatura dada.”

Absorción. - Según (ASTM C125-07, 2018):” Proceso por el cual un líquido es arrastrado dentro de un cuerpo sólido poroso y tiende a llenar los poros permeables del mismo; también se conoce como el aumento en masa de un cuerpo sólido poroso, resultante de la penetración de un líquido dentro de sus poros permeables”

Gravedad específica en condición seca al horno. - Según (ASTM C125-07, 2018):” Es la relación entre la masa del volumen de un material (incluyendo los poros permeables e impermeables en el material, pero excluyendo los vacíos entre las partículas del material) a una temperatura dada, a la masa del mismo volumen de agua destilada a la temperatura dada.”

Gravedad específica en condición saturada superficialmente seca. - Según (ASTM C125-07, 2018):” Es la relación entre la masa del volumen de un material incluyendo la masa de agua dentro de los poros en el material (pero excluyendo los vacíos entre las partículas) a una temperatura dada, a la masa del mismo volumen de agua destilada a la temperatura dada.”

Gravedad específica aparente. - Según (ASTM C125-07, 2018):” La masa por unidad de volumen ocupado por el conjunto de las partículas del agregado a granel (incluyendo el volumen de las partículas individuales y el volumen de los vacíos entre las partículas).”

4.4.2. Gravedad específica y absorción del agregado grueso y piedra caliza (ASTM C127)

Este ensayo consiste en colocar una muestra del agregado en el horno hasta que tenga un peso constante, luego se sumerge en el agua aproximadamente 24 horas para que sus espacios internos se llenen totalmente de agua. Una vez que el agua ha llenado todo el poro del agregado, se saca del agua y se seca solamente la superficie y por consiguiente se pesa. Luego se coloca el material en un contenedor bajo el agua para obtener el peso aparente mediante el desplazamiento del agua. Una vez realizado todo el proceso se vuelve a secar hasta que tenga un peso constante y se le pesa por última vez para así obtener los valores de peso seco (Delgado Alamilla, Garnica Anguas, Villatoro Mendez, & Rodríguez Oropeza, 2006).

4.4.2.1. Resultados del ensayo de Gravedad específica

a. Valores del ensayo

$$\text{Gravedad específica en condición seca al horno del agregado} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Gravedad específica en condición saturada superficialmente seca} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\text{Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Gravedad Específica Y Absorción GRUESO			
Muestra N	1	2	3
Descripción	Grueso	Caliza	Intermedio
B: Masa SSS (g)	5000	4982	3090
A: Masa Seca (g)	4853	4954	2974
C: Masa Sumergida Agua (g)	2987	3079	1807
Gravedad Específica SSD	2,484	2,618	2,408
Gravedad Específica OD	1,626	1,610	1,648
Densidad Aparente	2,601	2,642	2,548
Absorción	3,029	0,565	3,900

Tabla 4.12. Valores de Gravedad Específica y Absorción para agregados grueso y piedra caliza.

4.4.3. Gravedad específica y absorción de los agregados finos (ASTM C128)

El ensayo consiste en colocar una muestra de agregado fino seco en agua por 24 horas para que todos sus poros estén llenos de agua. Luego se coloca la muestra mojada en una superficie y se lo mezcla suavemente hasta conseguir así la condición de un secado superficial. Posteriormente se coloca agua en el picnómetro hasta una medida correspondiente y se introduce 500g de la muestra de agregado con superficie seca. Una vez colocado el material y el agua hasta la medida requerida, se procede a eliminar todas las burbujas de aire de la muestra mediante métodos manuales como la agitación del matraz (Delgado Alamilla et al., 2006). Cuando se observe que ya no existe ninguna burbuja, se procede a pesar la muestra del agua, matraz y agregado como conjunto, se le retira el agregado y se procede a secar hasta tener una masa constante para así obtener el peso de la masa seca.

4.4.3.1. Resultados del ensayo de Gravedad específica y absorción de los agregados finos.

a. Valores del ensayo.

$$\text{Gravedad específica en condición seca al horno del agregado} = \frac{A}{B + S - C}$$

$$\text{Gravedad específica en condición saturada superficialmente seca} = \frac{S}{B + S - C}$$

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{Absorción} = \frac{S - A}{A} * 100$$

Gravedad Especifica Y Absorción FINO	
Muestra N	1
Descripción	Fina
B: Masa Matraz + agua	667,2
C: Matraz + Agua + Muestra (g)	963,5
S: Masa SSS (g)	500
A: Masa Muestra Seca (g)	490
Gravedad Especifica OD	2,41
Gravedad Especifica SSD	2,45
Densidad Aparente	2,53
Absorción	2,04

Tabla 4.13. Valores de Gravedad especifica para el agregado fino.

4.5. Resistencia a los sulfatos (ASTM C-88).

El ataque de los sulfatos es uno de los mayores problemas que afectan a cualquier tipo de estructura y es una de las más peligrosas porque afecta directamente a la resistencia del material. Los sulfatos se encuentran principalmente en el suelo, en el agua o en diferentes desechos industriales, por lo tanto, es importante asegurar un material que sea capaz de resistirlo. Por lo tanto, se realiza ensayos en laboratorio para simular la afectación que tendría este componente en los agregados de una muestra asfáltica.

El ensayo consiste en separar mediante recipientes varios tamaños de material que ha pasado por los tamices analizados y han sido lavados, secados y pesados previamente. Una vez que el material se ha separado en varias fracciones, se introduce una solución de sulfato en todas las muestras que cubran todo el material de los recipientes. Posteriormente se hace un lavado de las muestras para quitar el sulfato y se le seca. Después se pasa por los tamices iniciales y se pesa con el fin de relacionar el peso de las muestras originales y el peso una vez realizado el ensayo.

4.5.1. Resultados del ensayo de resistencia a los sulfatos.

4.5.1.1. Valores del ensayo

Desgaste a los sulfatos en los agregados gruesos									
N°	Agregado grueso			Agregado intermedio			Piedra caliza		
Retiene	masa antes	muestra	Pérdida	masa antes	masa	Pérdida	masa	masa	Pérdida
1"							1005,1	916,2	8,84
3/4"	499	467,1	6,39				500	464,2	7,16
1/2"	669	614,2	8,19				671,4	637,7	5,02
3/8"				330	292,4	11,39	329,6	269,5	18,23
N° 4				300	232,83	22,39	300,2	261,2	12,99

Tabla 4.14. Valores del desgaste a los sulfatos en los agregados gruesos

Desgaste a los sulfatos en los agregados finos			
N° Tamiz	Agregado fino		
Retiene	masa antes del	muestra después	Pérdida total
N° 4			
N° 8	100	84,1	15,9
N° 16	100	81,1	18,9
N° 30	100	78,6	21,4
N° 50	100	75,8	24,2

Tabla 4.15. Valores del desgaste a los sulfatos en agregados finos.

4.5.1.2. Especificaciones del producto

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón	Máximo	12%
Resultado para agregado fino	No cumple	
Resultado para agregado intermedio	Cumple	
Resultado para agregado grueso	No cumple	
Resultado para piedra caliza	No cumple	

Tabla 4.16. Especificaciones del ensayo.

4.6. Ensayo de deletéreos (ASTM C-142)

Las partículas perjudiciales que se encuentran en los agregados que conforman una mezcla asfáltica, puede producir varios problemas en su capacidad sobre todo al momento de la adhesión entre los agregados y el cemento asfáltico lo que debilita su capacidad y resistencia. Estas partículas pueden ser aceites, esquistos, vegetación, etc.(Delgado Alamilla et al., 2006). El ensayo se realiza tanto para agregados finos y agregados gruesos y consiste en separar en recipientes varias muestras de los diferentes materiales y posteriormente sumergirlos en un líquido viscoso que permitirá que las partículas perjudiciales floten a la superficie y así poder pesar esas partículas para poder determinar el porcentaje que existe en el total de la muestra.

4.6.1. Resultados del ensayo de deletéreos.

4.6.1.1. Valores del ensayo

Deletéreos							
Muestra N	1	2	3	4	5	6	7
Descripción	Fino	Grueso 3/4	Grueso 1/2	Caliza N 4	Caliza 3/8	Caliza 3/4	Caliza 1/2
Masa Seca	146,6	1499,1	1501,1	200,7	1500	1500	1500
Masa Partículas Livianas	0,28	0,02	0,1	0,28	0	0	0,02
Deletéreos	0,191	0,001	0,007	0,140	0,000	0,000	0,001

Tabla 4.17. Valores del ensayo de deletéreos para agregado fino y agregado grueso

4.6.1.2. Especificaciones del producto

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón	Máximo	1%
Resultado para agregado fino	Cumple	
Resultado para agregado grueso	Cumple	
Resultado para piedra caliza	Cumple	

Tabla 4.18. Especificaciones para el ensayo de deletéreos

4.7. Angularidad de los agregados pétreos (ASTM D-5821).

4.7.1. Terminología.

Partícula fracturada. – Según (Delgado Alamilla et al., 2006): “Se considera una cara fracturada si el área proyectada es mayor o igual al 25% del área máxima proyectada y la cara es puntiaguda y margen bien definido.”

4.7.2. Angularidad de los agregados gruesos.

Se utiliza material grueso retenido en el tamiz No.4 para obtener la cantidad de partículas fracturadas que se encuentran en la muestra. El ensayo es de gran importancia ya que se necesita aumentar la resistencia a corte de los agregados mediante la fricción que existe en las partículas que también brindan estabilidad en las mezclas asfálticas.

El ensayo consiste en separar las partículas fracturadas de la muestra, lavarlas y pesarlas una vez que se hayan secado con el fin de obtener el porcentaje de partículas con caras fracturadas.

4.7.2.1. Resultados del ensayo de angularidad para agregados gruesos.

a. Valores del ensayo.

$$P = \frac{Mf}{Mt} * 100$$

Donde:

P: porcentaje de partículas con caras fracturadas.

Mf: masa de las partículas fracturadas con el menor número de caras fracturadas especificadas.

Mt: Masa del total de partículas

Partículas fracturadas para agregados gruesos					
Agregado grueso			Piedra Caliza		
Tamiz	% 1 cara fracturada	% 2 o más caras fracturadas	Tamiz	% 1 cara fracturada	% 2 o más caras fracturadas
1	95%	93%	1	91%	89%
1/2	96%	96%	1/2	93%	95%
3/8	97%	96%	3/8	97%	97%

Tabla 4.19. Valores de partículas fracturadas para agregado grueso y piedra caliza.

b. *Especificaciones del producto*

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón	Una cara fracturada	85%
Resultado para agregado grueso	Cumple	
Resultado para piedra caliza	Cumple	

Tabla 4.20. Especificaciones para partículas fracturadas de un cara fracturada.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón	Dos o más caras fracturadas	80%
Resultado para agregado grueso	Cumple	
Resultado para piedra caliza	Cumple	

Tabla 4.21. Especificaciones para partículas fracturadas de dos o más caras fracturadas.

4.7.3. *Angularidad de los agregados finos.*

El ensayo de angularidad para los agregados finos sirve para obtener el porcentaje de vacíos de este material con el fin de determinar las características de angularidad de los agregados. Si el material posee un porcentaje de vacíos alto, se considera que posee más partículas fracturadas que partículas esféricas. Consiste en colocar el material suelto en un cilindro con un volumen establecido y pesarlo. Existen 3 métodos para realizar este ensayo:

- **Método A:** el porcentaje de vacíos se obtiene bajo condiciones que depende de la forma y la textura del agregado analizado y se realiza el ensayo con una muestra obtenida del resultado de un tamizado del agregado fino. La muestra utilizada en este método es obtenida por materiales que pasa el tamiz No. 8 y que se retiene en el No. 100(Delgado Alamilla et al., 2006).
- **Método B:** al igual que el método A el porcentaje de vacíos depende de la forma y la textura del agregado analizado, en este caso se realiza el ensayo con muestras más

fracciones que el método A y puede resultar un poco más largo realizarlo (Delgado Alamilla et al., 2006).

- **Método C:** el porcentaje obtenido en este método depende de la forma y textura de la partícula y se utiliza material que pasa el tamiz No. 4 del material que se ha obtenido directamente del banco (Delgado Alamilla et al., 2006).

Este ensayo tiene como objetivo determinar el porcentaje de vacíos independientemente de los métodos que se aplique, ya que es un indicador útil para conocer varias propiedades del material como estabilidad, trabajabilidad, etc.

4.7.3.1. Resultados del ensayo de angularidad de los agregados finos.

a. Valores del ensayo

Partículas angulares agregado fino	
V: Volumen del cilindro cm³	100
F: Masa neta del agregado (g)	47,30
G: Densidad relativa seca	2,405
U: Vacíos sin compactar (%)	80,34

Tabla 4.22. Resultados para partículas angulares agregado fino

b. Especificaciones del producto.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón	Mínimo	45%
Resultado para agregado fino	Cumple	

Tabla 4.23. Especificaciones del ensayo de angularidad para agregado fino.

4.8. Ensayo de partículas alargadas y planas (ASTM D-4791).

Las partículas alargadas y planas en una mezcla asfáltica juegan un papel muy importante en la construcción del pavimento ya que una cantidad considerado de estas partículas puede afectar directamente a la consolidación del material y dificultad en la colocación. Por lo tanto, es necesario determinar el porcentaje de peso de partículas alargadas y planas en relación a su peso total, que se encuentran en los agregados que se utilizará para la conformación de la mezcla asfáltica. Este ensayo se realiza para materiales retenidos en tamiz No. 4 (4.75mm) en el cual sirve para obtener la partícula del agregado grueso donde la relación entre las dimensiones máximas y mínimas es mayor a 5 (Jorge & Delgado, 2011).

4.8.1. Resultado del ensayo de partículas alargadas y planas.

4.8.1.1. Valores del ensayo.

Partículas alargadas y planas para agregado grueso			
Tamiz	3/8	1/2	3/4
Masa de la muestra (gr)	813,4	1342,6	3757,1
Masa de las partículas alargadas (gr)	235,1	435,4	653,7
Masa de las partículas aplanadas (gr)	112,5	268,3	575,8
% partículas alargadas	28,903	32,430	17,399
% partículas planas	13,831	19,984	15,326

Tabla 4.24. Valores del ensayo de partículas alargadas y planas para agregado grueso

Partículas alargadas y planas para piedra caliza			
tamiz	3/8	1/2	3/4
Masa de la muestra (gr)	1092,1	1802,1	3924,1
Masa de las partículas alargadas (gr)	390,1	356,2	780,7
Masa de las partículas aplanadas (gr)	215,6	127,9	575,8
% partículas alargadas	35,720	19,766	19,895
% partículas planas	19,742	7,097	14,673

Tabla 4.25. Valores del ensayo para partículas alargadas y planas para piedra caliza.

4.8.1.2. Especificaciones del producto.

MOP-001F-2002 Sección 811. Agregados para hormigón	Máximo	10%
Resultado para agregado grueso	No Cumple	
Resultado para piedra caliza	No cumple	

Tabla 4.26. Especificaciones del ensayo de partículas alargadas y planas.

5. CAPÍTULO 5: ENSAYOS SOBRE LA MEZCLA ASFÁLTICA.

Para la realización de mezclas asfálticas en caliente cerrada y continua como se explicó anteriormente, es importante seleccionar el material granulométrico de manera correcta ya que de este modo se obtendrá economía por parte del ligante y un buen comportamiento por parte de la carpeta de rodadura.

Se debe de realizar un sin número de ensayos para sacar los puntos importantes del ensayo como lo son la estabilidad y flujo, el porcentaje de vacíos, porcentaje de asfalto, etc. para que además puedan cumplir con las normativas vigentes en la construcción. El método a realizar es el método Marshall el cual es aplicable en mezclas asfálticas en caliente que además tienen material cuyo tamaño máximo es de 25.4 mm.

Para el método de mezclas asfálticas en caliente, se deben realizar previamente varias operaciones las cuales influyen en gran medida el resultado, como los son:

- Previo ensayo de los agregados para determinar si se cumple con los requerimientos y especificaciones de la norma.
- Previo ensayo del ligante para determinar si se cumple con los requerimientos y especificaciones de la norma.
- La dosificación de los agregados cumpla las normas y especificaciones a lo que refiere a la granulometría.
- Se debe determinar el peso específico tanto de los agregados como el ligante asfáltico para utilizar dentro de los análisis de vacíos y de la densidad de las mezclas.

El principal objetivo al realizar las mezclas asfálticas en caliente por el método Marshall es determinar la relación que existe entre la densidad y volumen de las mezclas y poder analizarlas, además de determinar la estabilidad y flujo de las briquetas compactas para poder analizarlas y comparar sus resultados con las normas técnicas.

La estabilidad y flujo mencionadas anteriormente son importantes para determinarlas y analizarlas las cual significan:

- **Estabilidad:** Máxima carga en libras que puede resistir la briqueta normalizada a 60 C cuando se realiza el ensayo de rotura a compresión (Salvador & Salvador).
- **Flujo:** Movimiento o deformación total que se produce en la briqueta desde el comienzo hasta la carga máxima durante el ensayo de estabilidad, expresada en centésimas de pulgada (Salvador & Salvador).

5.1. Mezcla de agregados.

Para la obtención de la mezcla de los agregados, es importante usar agregados que presenten una buena granulometría, es por eso que se realizó la mezcla con tres tipos de agregados como los son fino, grueso e intermedio para que al unirlos estos ocupen todos los espacios y reduciendo el porcentaje de vacíos y tener muestras más compactas.

Para la mezcla de agregados se trabajó con un 20 % de material grueso, 20 % de material intermedio y un 60 % de material fino, con el fin de que el material fino logre cubrir todos los espacios que se generan al momento de realizar las briquetas, además para la obtención de la curva granulométrica por mallas se tomó una de las granulometrías indicadas en las tablas 405-5.1. de la MOP.

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

Tabla 5.1. Tabla de Granulometrías (MOP - 001-F, 2002).

Para la obtención de los porcentajes que se deben mezclar para obtener 1100 gramos y realizar las briquetas se procedió por tomar los valores intermedios de la curva como se muestra en la Ilustración 5.2 y de esta manera tener una granulometría de la curva para que precise en la mitad y no este con más material fino que grueso y viceversa como se muestra en la ilustración 5.1.

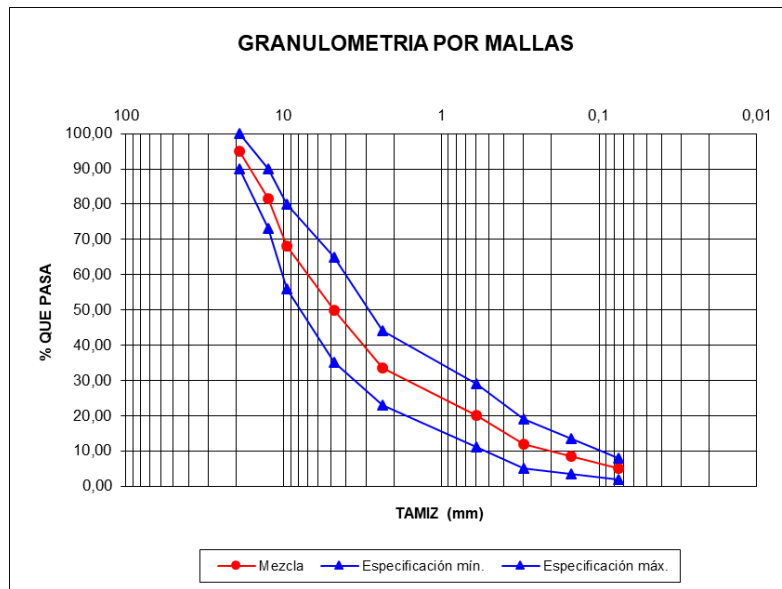


Ilustración 5.1. Granulometría de los agregados para la Mezcla.

Espec mín	100	90	73	56	35	23	11	5	3,5	2
Espec máx	100	100	90	80	65	44	29	19	13,5	8
Tz mm.	25,4	19	12,5	9,5	4,75	2,36	0,6	0,3	0,15	0,075

Ilustración 5.1. Valores máximos y mínimos de la curva junto a los Tamices (mm)

Con los valores obtenidos con los máximos y mínimos de la curva se reemplazaron los valores intermedios en la tabla 5.2 para poder obtener los porcentajes de material que se debe emplear en la briqueta de 1100 gramos o a su vez el peso que se debe colocar sea el parcial o acumulado y formar las briquetas para la realización del Marshall.

Tamiz #	1	3.4	1.2	3.8	4	8	30	50	100	200	p #200
Tz mm.	25,4	19	12,5	9,5	4,75	2,36	0,6	0,3	0,15	0,075	p 0,075
mat. A	100,00	100,00	69,56	12,00	2,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
mat. B	100,00	100,00	100,00	100,00	53,72	12,22	0,00	0,00	0,00	0,00	
mat. C	100,00	100,00	100,00	100,00	80,85	61,87	28,63	18,98	14,73	8,59	
mat. D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
mezcla	100,00	95,00	81,50	68,00	50,00	33,50	20,00	12,00	8,50	5,00	
Ret.Ac.	0,00	5,00	18,50	32,00	50,00	66,50	80,00	88,00	91,50	95,00	5,00
Ret.Parc.	0,00	5,00	13,50	13,50	18,00	16,50	13,50	8,00	3,50	3,50	
% peso	0,00	55,00	148,50	148,50	198,00	181,50	148,50	88,00	38,50	38,50	
% acum.	0,00	55,00	203,50	352,00	550,00	731,50	880,00	968,00	1006,50	1045,00	1100,00

Tabla 5.2. Porcentaje de material para la realización de las briquetas.

5.2. Diseño de Mezcla Asfáltica.

Para tener una idea del valor inicial de asfalto que se debe tomar se empleara una ecuación 1, la cual nos indica el valor con el que se debe trabajar para el método Marshall en donde emplea los valores tomados de la curva granulométrica y relaciona esta para darnos el resultado.

Para obtener el valor inicial del asfalto se utilizará el método francés el cual consiste en obtener el área superficial de los agregados (S), y de esta manera nos da de forma directa el porcentaje de cemento asfáltico empleando la curva granulométrica con respecto a la briqueta de 1100 gramos.

$$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f \quad (1)$$

Donde:

G: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz 3/8".

g: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz 3/8" y se retiene en el # 4.

A: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz # 4 y se retiene en el # 50.

a: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz # 50 y se retiene en el # 200.

f: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz # 200.

Una vez obtenido el valor del área superficial de los agregados se coloca el valor del coeficiente del tráfico el cual se encuentra entre 3,75 y 4,25. Para el diseño estudiado se tomó el valor de 4 siendo este un valor medio por el cual es conservador.

Finalmente, para obtener el valor del porcentaje de asfalto se debe reemplazar el valor obtenido del área superficial y el coeficiente del tráfico en la ecuación 2.

$$P = M * P^{0,2} \quad (2)$$

Calculo del Porcentaje de Asfalto			
G	Mayor a 3/8	32,00	0,32
g	3/8 - #4	18,00	0,18
A	#4 - #50	38,00	0,38
a	#50 - #200	7,00	0,07
f	Menor a #200	5,00	0,05
S	$S = 0.17G + 0.33g + 2.30A + 12a + 135f$		8,578
P	$P = M * P^{0,2}$		6,15

Tabla 5.3. Porcentaje Inicial de cemento asfáltico.

Una vez obtenido como resultado el 6 % de cemento asfáltico, se debe utilizar valores de 0,5 por debajo y por arriba para así obtener 5 diferentes porcentajes de asfalto y ensayar 3 briquetas por cada porcentaje, de esta manera se obtendrá el peso del asfalto (3) que se debe colocar en la mezcla para obtener las briquetas, mezclarlas y posteriormente ensayarlas.

$$\% \text{Asf} = \frac{W_{\text{asfalto}}}{W_{\text{agregado}} + W_{\text{asfalto}}} \quad (3)$$

5.2.1. Peso específico Bulk.

Teniendo como datos iniciales los valores de las gravedades específicas tanto de los agregados finos como los gruesos, se obtiene el peso específico Bulk, considerando como una sola masa, es decir, sin vacíos. De tal manera el peso específico Bulk es la relación que se tiene entre el peso de la briketa a ensayarse, sobre el peso de igual volumen de agua, incluyendo el volumen de vacíos permeables e impermeables.

Para obtener el valor del peso específico Bulk se tendrá que tomar en cuenta tres valores los cuales nos ayudara a obtener el resultado, como lo son el peso seco en el aire, el peso saturado con superficie seca y el peso sumergido en agua, mencionado lo anterior se va a tener una relación entre el peso seco en el aire de la briketa ya mezclada sobre la resta de los dos anteriores como se muestra en la ecuación 4.

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

Donde:

Gb: Peso específico Bulk.

Wa: Peso seco en aire.

Wss: Peso saturado con superficie seca.

Ww: Peso sumergido en el agua.

Peso Específico Bulk		
	Porcentaje	Valor
Muestra 1	5 %	2,176
Muestra 2	5 %	2,20
Muestra 3	5 %	2,185
Muestra 4	5,5 %	2,214
Muestra 5	5,5 %	2,204
Muestra 6	5,5 %	2,207
Muestra 7	6 %	2,225
Muestra 8	6 %	2,224
Muestra 9	6 %	2,216
Muestra 10	6,5 %	2,242
Muestra 11	6,5 %	2,198
Muestra 12	6,5 %	2,221
Muestra 13	7 %	2,217
Muestra 14	7 %	2,211
Muestra 15	7 %	2,222

Tabla 5.4. Peso Específico Bulk.

5.2.2. Peso Específico Bruto del Agregado Total.

Debido a que se tiene tres diferentes tipos de materiales como los son el material grueso, intermedio y fino, se tendrán tres diferentes gravedades específicas de los materiales, al momento de obtener el peso específico bruto del agregado total se va a dividir el porcentaje de material que se puso en la mezcla, como se mencionó anteriormente, de 20 % de grueso, 20 % de intermedio y 60 % de fino, para su gravedad específica y todo esto será dividido para el 100 % del material ya que la suma de los tres materiales nos da un total del 100 %.

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Donde:

Gsb: Peso específico bruto del agregado total.

P1, n: Porcentajes de la mezcla.

G1, n: Peso específico de cada material.

Peso Específico Bruto del Agregado Total	
	Valor
G_{sb}	2,472 %

Tabla 5.5. Peso Específico Bruto del Agregado Total.

5.2.3. Peso Específico Máximo Teórico.

El peso específico máximo teórico nos da una representación del peso que tiene cada briqueta sin vacíos, es por eso que se le denomina peso teórico ya que ninguna mezcla puede darse de esta manera.

El cálculo del peso específico máximo teórico va a depender solo del porcentaje de asfalto que se imprima a las muestras, es decir, va a existir 1 valor por cada porcentaje de asfalto, además del peso específico promedio obtenido anteriormente.

$$G_{mt} = \frac{100}{\frac{P_s}{G_{sb}} + \frac{P_b}{G_{asf}}}$$

Donde:

Gmt: Peso específico máximo teórico.

Ps: Porcentajes de agregado en la mezcla.

Pb: Porcentajes de asfalto en la mezcla.

Gsb: Peso específico bruto del agregado total.

Gasf: Gravedad específica del asfalto.

Peso Específico Máximo Teórico.		
	Porcentaje	Valor
Muestra 1,2,3	5 %	2,305
Muestra 4,5,6	5,5 %	2,290
Muestra 7,8,9	6 %	2,275
Muestra 10,11,12	6,5 %	2,260
Muestra 13,14,15	7 %	2,245

Tabla 5.6. Peso Específico Máximo Teórico.

5.2.4. Peso Específico Máximo Medido (Rice).

Lo que se muestra a continuación son formulas teóricas obtenido de los resultados previamente los cuales van a ser necesarios para obtener el porcentaje óptimo de diseño el cual muestra parámetros de la mezcla asfáltico y su comportamiento para comparar las briquetas con su porcentaje de asfalto.

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

Donde:

Gmm: Peso Específico Máximo Medido.

A: Peso de la muestra seca en el aire.

B: Peso del matraz lleno con agua a 25 C.

C: Peso del matraz con agua y muestra.

Peso Específico Máximo Medido (Rice).		
	Porcentaje	Valor
Muestra 1,2,3	5 %	2,348
Muestra 4,5,6	5,5 %	2,343
Muestra 7,8,9	6 %	2,332
Muestra 10,11,12	6,5 %	2,308
Muestra 13,14,15	7 %	2,301

Tabla 5.7. Peso Específico Máximo Medido (Rice).

5.2.4.1. *Peso Específico Efectivo del Agregado.*

El peso específico efectivo del agregado va a ser calculado con el peso específico máximo teórico del material. Lo que trata de hacer el ensayo es obtener el volumen de asfalto absorbido por el agregado de la briqueta restando el volumen del agua absorbida.

Este valor estará generalmente entre el valor del peso específico Bulk y del peso específico aparente (bruto), si el valor se encuentra fuera de este rango, el valor que se ha tomado está erróneo. El valor de este cálculo es significativo para calcular las cantidades de vacíos de las briquetas, el porcentaje de cemento asfáltico absorbido por el agregado.

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

Donde:

Gse: Peso específico efectivo teórico.

Gmt: Peso específico máximo teórico.

Pb: Porcentajes de asfalto en la mezcla.

Gasf: Gravedad específica del asfalto.

Peso Específico Efectivo del Agregado	
	Valor
Gse	2,472

Tabla 5.8. *Peso Específico Efectivo del Agregado.*

5.2.4.2. *Asfalto Absorbido.*

El asfalto absorbido es fundamental determinar ya que nos da una idea de todo lo que se “perderá” en la mezcla debido a la absorción del mismo mediante los agregados, el valor obtenido se basa por el peso en kgs de cemento asfáltico por cada 100 kgs de agregados secos de la mezcla (Salvador & Salvador).

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

Donde:

Gse: Peso específico efectivo teórico.

Gsb: Peso específico bruto del agregado total.

Gasf: Gravedad específica del asfalto.

Asfalto Absorbido		
	Porcentaje	Valor
Muestra 1,2,3	5 %	0.0007
Muestra 4,5,6	5,5 %	0.0007
Muestra 7,8,9	6 %	0
Muestra 10,11,12	6,5 %	0
Muestra 13,14,15	7 %	0

Tabla 5.9. Asfalto Absorbido.

5.2.4.3. *Relación Filler/Asfalto.*

El Filler y el asfalto juegan un papel importante ya que al conformarse como una masa esta se vuelve impermeable además de dar una durabilidad en la mezcla asfáltica, entre mayor es la relación de Filler asfalto se tiene como indicador que se agregó mayor cantidad de finos en relación de la cantidad de asfalto.

El Filler complementa la mezcla asfáltico como esqueleto mineral ayudando a soportar las tensiones que se dan por rozamiento interno, además de rellenar los espacios vacíos entre el agregado grueso, intermedio y fino, de esta manera limita el movimiento de los agregados aportando con estabilidad a las briquetas.

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

Donde:

P_{be}: Porcentaje de asfalto efectivo

f/a: Relación Filler/asfalto.

Relación Filler/Asfalto		
	Porcentaje	Valor
Muestra 1,2,3	5 %	1,458
Muestra 4,5,6	5,5 %	1,325
Muestra 7,8,9	6 %	1,215
Muestra 10,11,12	6,5 %	1,121
Muestra 13,14,15	7 %	1,041

Tabla 5.10. Relación Filler/Asfalto.

5.2.4.4. *Volumen de agregado vs Volumen total.*

El porcentaje de volumen de agregado respecto al volumen total nos da la medida de agregado como dice su nombre respecto a la briqueta de la mezcla asfáltico.

$$V_{agre} = \frac{P_s * G_b}{G_{sb}}$$

Donde:

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

G_b: Peso específico Bulk.

P_s: Porcentajes de agregado en la mezcla.

G_{sb}: Peso específico bruto del agregado total.

Volumen Agregado Vs Volumen total.		
	Porcentaje	Valor
Muestra 1,2,3	5 %	84,04 %
Muestra 4,5,6	5,5 %	84,43 %
Muestra 7,8,9	6 %	84,48 %
Muestra 10,11,12	6,5 %	83,98 %
Muestra 13,14,15	7 %	83,39 %

Tabla 5.11. Volumen agregado Vs volumen total.

5.2.4.5. Vacíos con aire.

Es importante determinar los vacíos con aire para así poder obtener la curva de la misma y poder comparar con los valores requeridos para ver si estos cumplen. Los vacíos con aire son espacios pequeños que se encuentran en las mezclas finales compactadas, es importante que se tenga cierto porcentaje de vacíos para que estos sean compactados cuando se tenga una mezcla densa debido al tráfico muy pesado.

Es importante que el valor de la curva este dentro del rango de 3 a 5 %, se tomara el valor de 4% ya que es un valor conservador entre ese rango. Entrando con ese valor en la curva se obtendrá el porcentaje óptimo de asfalto. Una vez obtenido el porcentaje optimo se verifica las demás propiedades como lo son: la estabilidad, fluencia, vacíos de agregado mineral y vacíos con asfalto.

En caso de que no cumpla con el 4 % de vacíos se realiza un promedio entre el 4% de volumen de vacíos, más el máximo valor de la estabilidad y el máximo valor de la densidad Bulk y de esta manera se verifican las propiedades como lo son: la fluencia, los vacíos de agregados minerales y vacíos con asfalto.

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

Donde:

Vv: Vacíos con aire

Gb: Peso específico Bulk.

Gmm: Peso específico Máximo medido.

Vacíos con aire		
	Porcentaje	Valor
Muestra 1,2,3	5 %	6,85 %
Muestra 4,5,6	5,5 %	5,76 %
Muestra 7,8,9	6 %	4,72 %
Muestra 10,11,12	6,5 %	3,79 %
Muestra 13,14,15	7 %	3,69 %

Tabla 5.12. Vacíos con aire.

5.2.4.6. *Vacíos con agregado mineral (VAM).*

Los vacíos con agregado mineral es una relación la cual indica una proporción volumétrica de los vacíos de la mezcla asfáltica y el volumen de los agregados de la misma mezcla asfáltica compactada. El VAM es relacionado de manera directa con la cantidad de asfalto que se necesita para un agregado específico.

$$VAM = 100 - Vagre$$

Donde:

VAM: Vacíos del agregado mineral.

Vagre: Volumen de agregado vs Volumen total.

Vacíos con aire		
	Porcentaje	Valor
Muestra 1,2,3	5 %	15,96 %
Muestra 4,5,6	5,5 %	15,57 %
Muestra 7,8,9	6 %	15,52 %
Muestra 10,11,12	6,5 %	16,02 %
Muestra 13,14,15	7 %	16,61 %

Tabla 5.13. Vacíos con aire.

5.3. Método Marshall.

Además de la tabla de granulometrías y la gráfica de las granulometrías para obtener la mezcla es necesario adicionar otros gráficos los cuales se comprobarán con las normas MOP y nos darán el valor de contenido óptimo de asfalto para poder realizar las muestras Marshall con la modificación de las briquetas aumentando la piedra caliza.

Por el método Marshall se obtendrán las curvas de Estabilidad y Flujo, mencionadas anteriormente, en el cual se debe corregir la estabilidad mediante la Tabla 5.14, y así obtener las gráficas mencionadas posteriormente con los distintos contenidos de cemento asfáltico.

Para corregir se necesita el volumen aproximado y el espesor de cada biqueta, una vez que se tienen estos valores se entra a la tabla 5.14 mencionada anteriormente y con estos valores corregidos se les debe multiplicar a los valores obtenidos de estabilidad para poder graficar la curva de estabilidad corregida. De esta manera se obtendrán las siguientes graficas.

CORRECCIÓN DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD		
VOLUMEN DE LA BRIQUETA (cm ²)	ESPESOR APROXIMADO DE LA BRIQUETA (cm)	FACTOR DE CORRECCIÓN
200 – 213	2.54	5.56
214 – 225	2.70	5.00
226 – 237	2.86	4.55
238 – 250	3.02	4.17
251 – 264	3.17	3.85
265 – 276	3.33	3.57
277 – 289	3.49	3.33
290 – 301	3.65	3.03
302 – 316	3.81	2.78
317 – 328	3.97	2.50
329 – 340	4.13	2.27
341 – 353	4.29	2.08
354 – 367	4.44	1.92
368 – 379	4.60	1.79
380 – 392	4.76	1.67
393 – 405	4.92	1.56
406 – 420	5.08	1.47
421 – 431	5.24	1.39
432 – 443	5.40	1.32
444 – 456	5.56	1.25
457 – 470	5.71	1.19
471 – 482	5.87	1.14
483 – 495	6.03	1.09
496 – 508	6.19	1.04
509 – 522	6.35	1.00
523 – 535	6.51	0.96
536 – 546	6.67	0.93
547 – 559	6.82	0.89
560 – 573	6.96	0.86
574 – 585	7.14	0.83
586 – 598	7.30	0.81
599 – 610	7.46	0.78
611 – 625	7.62	0.76

Tabla 5.14. Factor de Corrección de la Estabilidad (MOP - 001-F, 2002).

- Porcentaje de vacíos de la mezcla total (Vv) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Peso Específico Bulk vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VAM) vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Flujo vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.
- Estabilidad Corregida vs Porcentaje de Cemento Asfáltico.

5.3.1. Graficas.

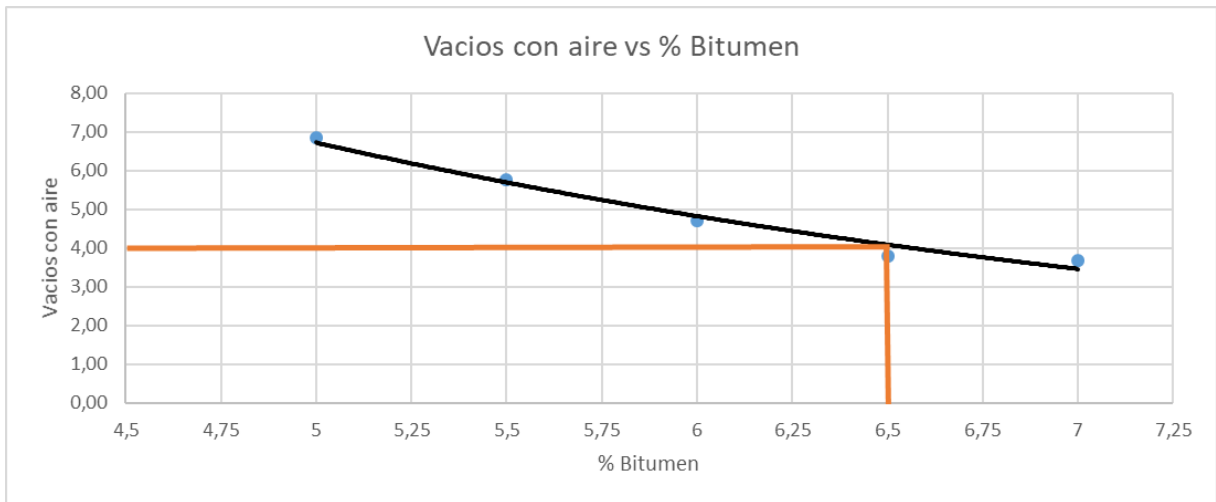


Ilustración 5.3. Vacíos con Aire.

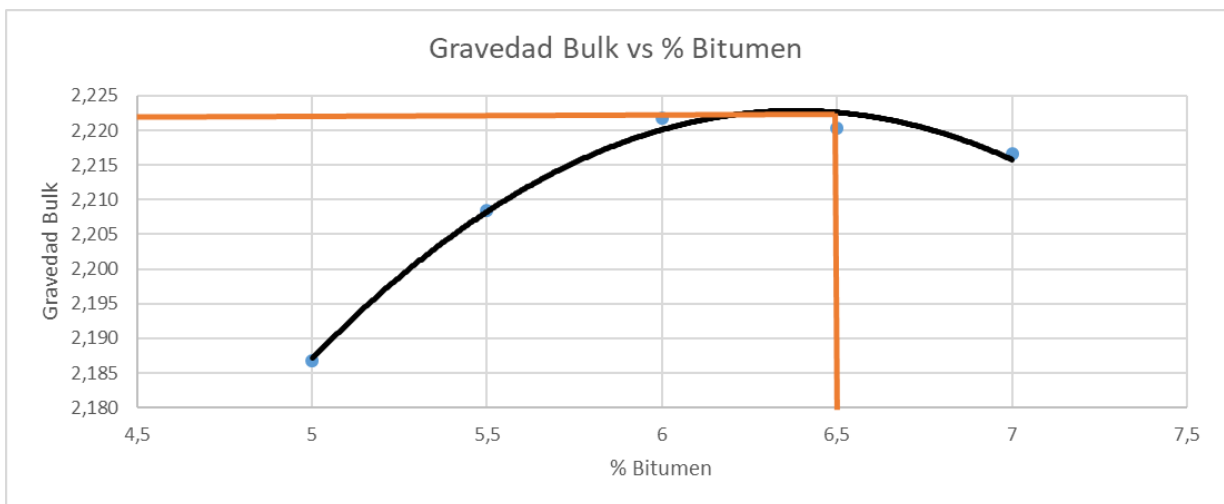


Ilustración 5.4. Gravedad Bulk.

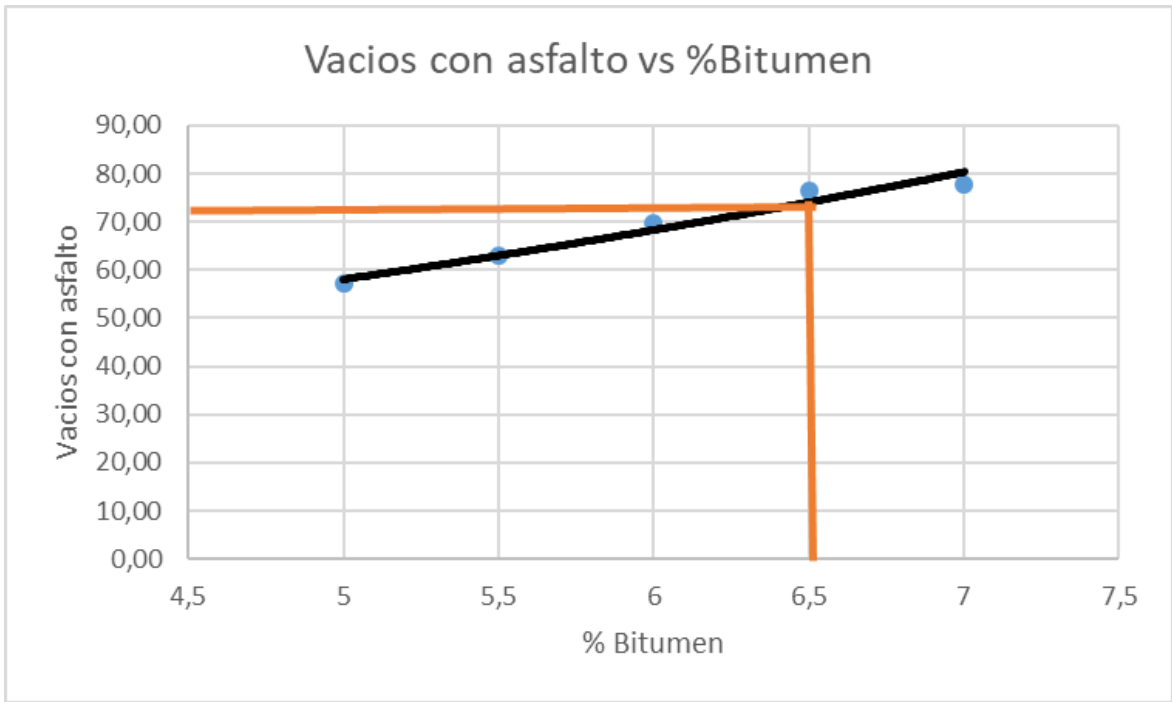


Ilustración 5.5. Vacíos con asfalto

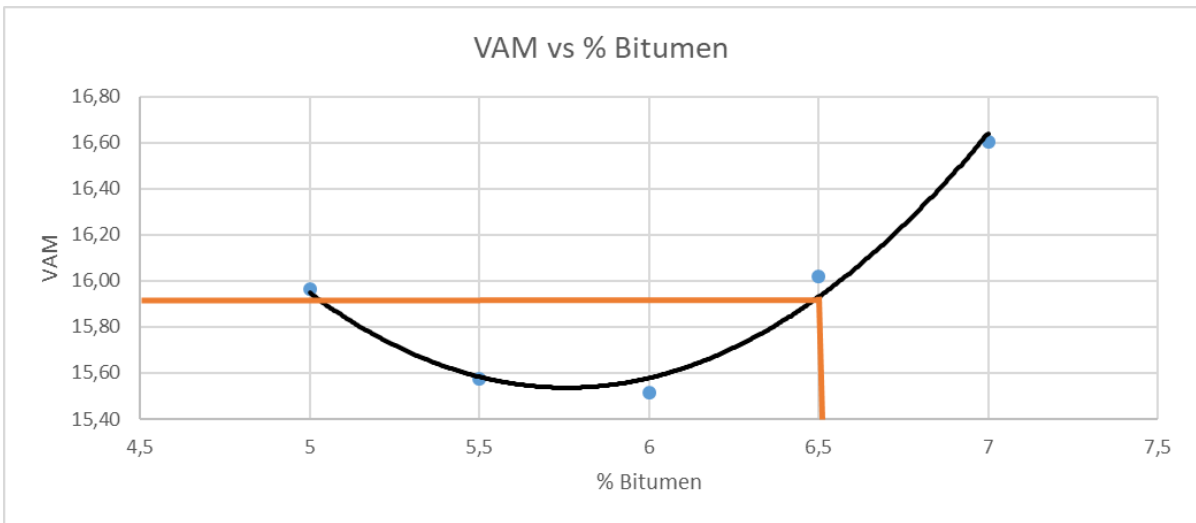


Ilustración 5.6. VAM.

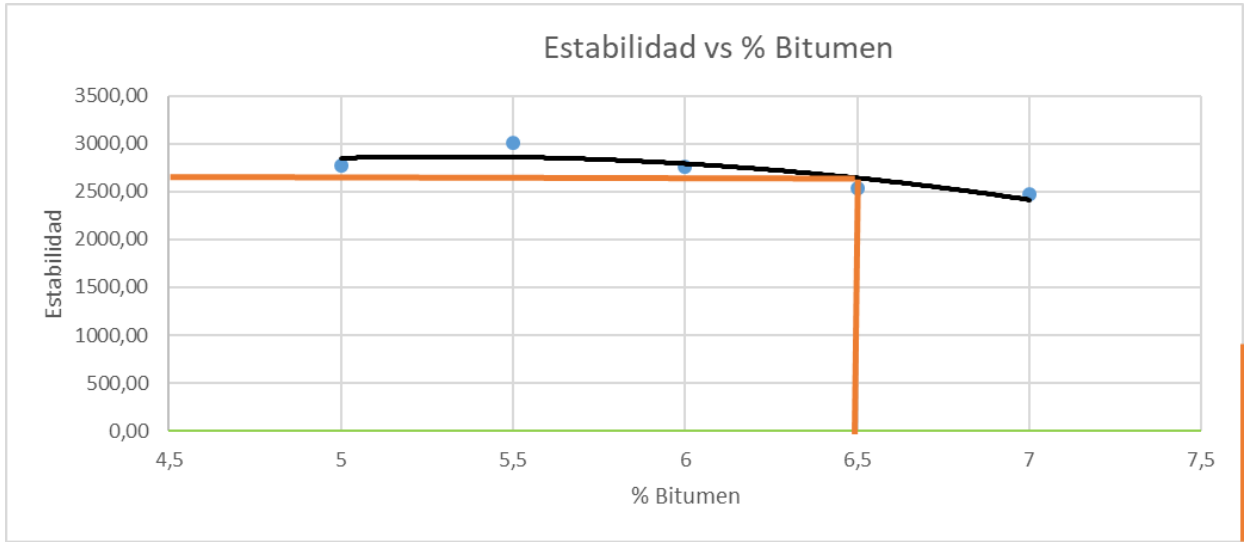


Ilustración 5.7. Estabilidad.

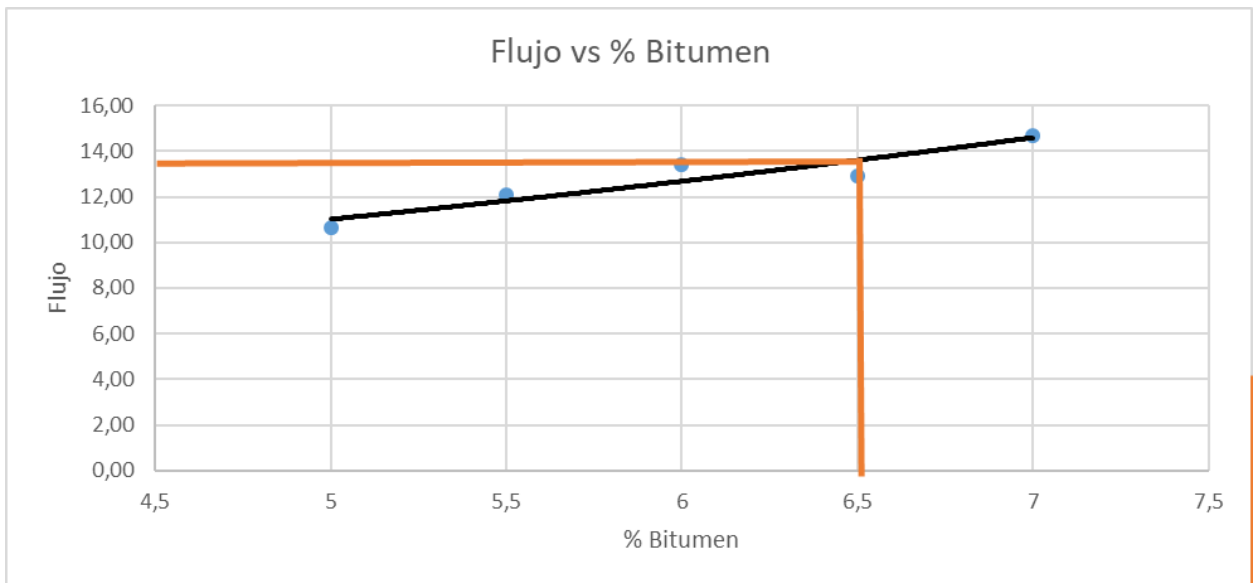


Ilustración 5.8. Flujo.

6. Análisis de Resultados.

6.1. Resultados del Cemento Asfáltico.

Posterior a realizarse los ensayos se clasificará el asfalto y se comparara los valores obtenidos con las especificaciones que se describen en la tabla 5 y 7 de la norma NTE INEN 2515, respecto a los requisitos para Asfalto Cemento gradual Viscosidad a 60 °C [140 °F] a base de asfalto original.

Resumen del Cemento Asfáltico.					
Ensayo	Resultado	Norma	Especificaciones del MOP		
			Mínimo	Máximo	Cumple
Viscosidad Absoluta a 60 °C	285,56	ASTM D-2171	160	240	No
Viscosidad Cinemática a 135 °C.	405,88	ASTM D-2170	300	-----	Si
Punto de Ablandamiento.	51,51	ASTM D-36	-----	-----	-----
Penetración a 25 °C, 100g, 5seg.	78,83	NTE INEN 917	60	-----	Si
Punto de inflamación.	323	ASTM D-92	232	-----	Si
Gravedad Especifica (kg/m ³).	1009,25	ASTM D-70	-----	-----	-----
Índice de Penetración.	0,26	ASTM D-5	-1,5 %	1 %	Si
Viscosidad Absoluta a 60 C RTFO.	694,21	ASTM D-2171	-----	800	Si
Ductilidad a 25 C, 5cm/min RTFO.	46	ASTM D-36	50	-----	No
Cambio de masa	-0,002	ASTM D-2872	1 %	1 %	Si

Tabla 6.1. Resumen de los ensayos obtenidos del Cemento Asfáltico.

6.2. Resultados de los Agregados.

La determinación de los resultados de los agregados se ha tomado en base a la norma MOP donde especifica los valores máximos y mínimos los cuales deben tener cada uno de los ensayos para que el material sea el apropiado y cumpla lo requerido para que se produzca la mezcla asfáltica.

6.2.1. Agregado Fino.

Resumen de los Agregados					
Ensayo	Resultado	Norma	Especificaciones del MOP		
			Mínimo	Máximo	Cumple
Equivalente de Arena	92,9 %	ASTM D-2419	50 %	-----	Si
Gravedad Especifica	2,45	ASTM C-128	-----	-----	-----
Absorción.	2,04	ASTM C-128	-----	-----	-----
Desgaste a los Sulfatos # 50.	24,2	ASTM C-88	-----	12 %	No
Deletéreos	0,191	ASTM C-142	-----	1 %	Si
Angularidad de los agregados.	80,34 %	ASTM D-5821	45 %	-----	Si

Tabla 6.2. Resumen de los ensayos obtenidos del Agregado Fino.

6.2.2. Agregado Grueso.

Resumen de los Agregados					
Ensayo	Resultado	Norma	Especificaciones del MOP		
			Mínimo	Máximo	Cumple
Abrasión (Maquina de los Ángeles)	8,2 %	ASTM C-131	----	40	Si
Gravedad Especifica	2,484	ASTM C-127	----	----	----
Absorción.	3,03	ASTM C-127	----	----	----
Desgaste a los Sulfatos 1/2".	8,19	ASTM C-88	----	12 %	Si
Deletéreos	0,001	ASTM C-142	----	1 %	Si
Angularidad (1 cara) 1".	95 %	ASTM D-5821	85 %	----	Si
Angularidad (2 caras) 1".	93 %	ASTM D-5821	80 %	----	Si
Partículas Alargadas ½"	32,43%	ASTM D-4791	10 %	----	No
Partículas Planas 1/2".	19,98 %	ASTM D-4791	10 %	----	No

Tabla 6.3. Resumen de los ensayos obtenidos del Agregado Fino.

6.2.3. Piedra Caliza.

Resumen de los Agregados					
Ensayo	Resultado	Norma	Especificaciones del MOP		
			Mínimo	Máximo	Cumple
Abrasión (Maquina de los Ángeles)	44,72 %	ASTM C-131	----	40	No
Gravedad Especifica	2,618	ASTM C-127	----	----	----
Absorción.	0,56	ASTM C-127	----	----	----
Desgaste a los Sulfatos 3/8".	18,23	ASTM C-88	----	12 %	No
Deletéreos # 4	0,14	ASTM C-142	----	1 %	Si
Angularidad (1 cara) 1".	91 %	ASTM D-5821	85 %	----	Si
Angularidad (2 caras) 1".	89 %	ASTM D-5821	80 %	----	Si
Partículas Alargadas 3/8".	34,72 %	ASTM D-4791	10 %	----	No
Partículas Planas ½".	19,72 %	ASTM D-4791	10 %	----	No

Tabla 6.4. Resumen de los ensayos obtenidos del Agregado Fino

6.3. Resultado de la Mezcla Asfáltica.

Muestra No.	% grueso	PESO EN GRAMOS			PESO ESPECIFICO						Volumen				V. lleno de asf.	A. efectivo	f/a
		Seco	SSS en aire	En agua	G. Bulk	Gsb	Asfalto	Gmt	Gmm	Gse	A. absorbido	V. agre	Vv	VAM			
1		1132,63	1135,38	614,77	2,176								7,33				
2		1129,44	1133,35	619,98	2,200								6,29				
3		1135,82	1138,43	618,5	2,185								6,95				
PROM	5				2,187	2,472	1,012	2,3057	2,348	2,472	-7,355E-15	84,04	6,85	15,96	57,06	5	1,458
4		1148,34	1150,36	631,65	2,214								5,53				
5		1149,39	1151,9	630,46	2,204								5,94				
6		1152,56	1154,77	632,59	2,207								5,81				
PROM	5,5				2,208	2,472	1,012	2,2902	2,343	2,472	7,35469E-15	84,43	5,76	15,57	63,00	5,5	1,3254545
7		1154,6	1157,17	638,24	2,225								4,58				
8		1152,84	1155,63	637,24	2,224								4,62				
9		1157,53	1160,35	638,06	2,216								4,95				
PROM	6				2,222	2,472	1,012	2,2750	2,332	2,472	0	84,48	4,72	15,52	69,59	6	1,215
10		1161,51	1162,17	644,12	2,242								2,84				
11		1143,61	1147,83	627,53	2,198								4,76				
12		1167,34	1169,01	643,35	2,221								3,77				
PROM	6,5				2,220	2,472	1,012	2,2600	2,308	2,472	0	83,98	3,79	16,02	76,34	6,5	1,1215385
13		1161,51	1163,34	639,45	2,217								3,67				
14		1168,94	1169,94	641,32	2,211								3,92				
15		1172,31	1173,96	646,27	2,222								3,47				
PROM	7				2,217	2,472	1,012	2,2452	2,301	2,472	0	83,39	3,69	16,61	77,81	7	1,0414286

Ilustración 6.1. Resultado de la Mezcla.

Muestra No.	% Asfalto	Volumen (cm3)	Estabilidad(kg)	Flujo	Factor de correccion	Estabilidad corregida	Estabilidad promedio	Flujo promedio
1		566,66	3750	12	0,86	3225		
2		535,50	2975	10,5	0,96	2856		
3		538,59	2425	9,5	0,93	2255,25		
PROMEDIO	5						2778,75	10,67
4		536,93	3575	12,5	0,93	3324,75		
5		538,29	2960	9,75	0,93	2752,8		
6		538,70	3190	14	0,93	2966,7		
PROMEDIO	5,5						3014,75	12,08
7		543,15	3000	13,5	0,93	2790		
8		548,95	3150	13	0,89	2803,5		
9		541,63	2880	13,75	0,93	2678,4		
PROMEDIO	6						2757,30	13,42
10		527,60	3150	15	0,96	3024		
11		549,73	2150	11,25	0,89	1913,5		
12		541,88	2870	12,5	0,93	2669,1		
PROMEDIO	6,5						2535,53	12,92
13		530,47	2900	14,5	0,96	2784		
14		557,41	2600	14,5	0,89	2314		
15		543,00	2500	15	0,93	2325		
PROMEDIO	7						2474,33	14,67

Ilustración 6.2. Resultados de estabilidad y flujo.

6.3.1. Obtención del Porcentaje Optimo de Asfalto.

Para obtener el porcentaje optimo como se mencionó anteriormente se entrará a la curva de Vacíos con Aire vs Porcentaje de Cemento Asfáltico con los datos de la ilustración 5.3 y se debe compara los valores obtenidos entrando a las curvas como se muestra en la línea de color naranja de las ilustraciones de la 5.3 a la 5.8.

% Bitumen	Gravedad Bulk	Estabilidad	Vacios con aire	Flujo	Vacios del agregado mineral	Vacios con asfalto
5	2,187	2778,75	6,85	10,67	15,15	54,75
5,5	2,208	3014,75	5,76	12,08	14,75	60,94
6	2,222	2757,30	4,72	13,42	14,70	67,89
6,5	2,220	2535,53	3,79	12,92	15,20	75,07
7	2,217	2474,33	3,69	14,67	15,79	76,67

Tabla 6.5. Datos para la obtención de las curvas.

Los datos serán comparados con las Especificaciones MOP-001-f de la Tabla 405.5.4 y 405.5.5 mostradas a continuación.

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

Tabla 6.6. Especificaciones del Marshall (MOP - 001-F , 2002).

Tipo de Mezcla	VAM, Mínimo (%)
A	16
B	15
C, D	14
E	13

Tabla 6.7. Especificaciones del VAM (MOP - 001-F , 2002)

Comparación de Resultados del Marshall		
	Valor	Cumple
Estabilidad	2600	Si
Flujo	13,85	Si
% De Vacíos	4 %	Si
VAM	15,10 %	Si

Tabla 6.8. Valores Obtenidos

6.4. Ensayos con el Óptimo de Asfalto.

En un comienzo se reemplazaría el agregado grueso con la piedra caliza, este proceso se ensayaría mediante el método Marshall y se comprobaría con una mezcla asfáltica con el óptimo de asfalto, de esta manera comprobaríamos y obtendríamos los resultados para ver que mezcla asfáltica tiene mejores propiedades.

Debido a que al realizarse el ensayo de abrasión utilizando la máquina de los ángeles nos dio un valor superior al que se requiere, reemplazo la piedra caliza en porcentajes y de esta manera reemplazar al agregado grueso. Tomando en cuenta la muestra patrón, es decir, sin modificar, se analizará con la muestra que obtenga los mejores resultados.

Los porcentajes que se van a utilizar son los siguientes:

Variación de Porcentajes		
	Agregado Grueso	Piedra Caliza
Muestra 1	75 %	25 %
Muestra 2	50 %	50 %
Muestra 3	25 %	75 %

Tabla 6.9. Variación de Piedra Caliza.

De esta manera se procedió a elaborar las briquetas, las cuales se distribuyen en 4 grupos, empezando por el patrón, y reemplazando por los porcentajes mostrados en la tabla 6.9 con un porcentaje óptimo de asfalto del 6,5 % obtenido anteriormente. Así, se obtuvieron tres tablas las cuales representan el valor de cada tamiz que se debe reemplazar como se muestran en las siguientes tablas:

Porcentaje	75% Grueso	25% Caliza
Tamiz #	Gramos	
3/4	41,25	13,75
1/2	111,38	37,13
3/8	111,38	37,13

Tabla 6.10. Primer Porcentaje.

Porcentaje	50% Grueso	50% Caliza
Tamiz #	Gramos	
¾	27,5	27,5
½	74,25	74,25
3/8	74,25	74,25

Tabla 6.11. Segundo Porcentaje.

Porcentaje	75% Grueso	25% Caliza
Tamiz #	Gramos	
¾	13,75	20,63
½	37,13	55,68
3/8	37,13	55,68

Tabla 6.12. Tercer Porcentaje.

6.5. Método Marshall con el Óptimo de Asfalto.

Conocidos los pasos a seguir para obtener los valores de las propiedades que se requieren para comparar los resultados entre la muestra patrón y las modificaciones de las briquetas, se va a mostrar la tabla con los resultados obtenidos.

Muestra No.	% grueso	PESO EN GRAMOS			PESO ESPECIFICO						Volumen				V. lleno de asf.	A. efectivo	f/a
		Seco	SSS en aire	En agua	G. Bulk	Gsb	Asfalto	Gmt	Gmm	Gse	Asfalto absorbido	V. agre	Vv	VAM			
1		1163,41	1164,73	651,61	2,267								2,80				
2		1163,88	1164,1	660,84	2,313								0,85				
3		1159,3	1159,54	659,05	2,316								0,70				
PROM	25				2,299	2,448	1,012	2,2414	2,333	2,448	0,0	87,79	1,45	12,21	88,12	6,5	1,122
4		1169,3	1169,85	662,71	2,306								1,23				
5		1169,15	1169,39	661,61	2,302								1,36				
6		1157,44	1158,19	658,16	2,315								0,84				
PROM	50				2,308	2,448	1,012	2,2414	2,334	2,448	0,0	88,13	1,14	11,87	90,37	6,5	1,122
7		1165,09	1166,58	648,43	2,249								3,10				
8		1165,78	1166,14	649,48	2,256								2,77				
9		1164,3	1165,41	643,52	2,231								3,86				
PROM	75				2,245	2,448	1,012	2,2414	2,321	2,448	0,0	85,75	3,25	14,25	77,22	6,5	1,122

Tabla 6.13. Mezcla modificada

Muestra No.	% material grueso	Volumen (cm3)	Estabilidad(kg)	Flujo	Factor de correccion	Estabilidad corregida	Estabilidad promedio	Flujo promedio
1		521,71	2900	13,5	1	2900		
2		511,55	3980	13,5	1	3980		
3		508,07	1750	14	1,04	1820		
PROMEDIO	25						2900,00	13,67
4		518,35	3800	15	1	3800		
5		520,64	4100	15	1	4100		
6		510,29	4550	16	1	4550		
PROMEDIO	50						4150,00	15,33
7		540,13	3300	15	0,93	3069		
8		529,37	3100	14	0,96	2976		
9		538,81	3500	16	0,93	3255		
PROMEDIO	75						3100,00	15,00

Tabla 6.14. Valores de estabilidad y flujo de la mezcla modificada

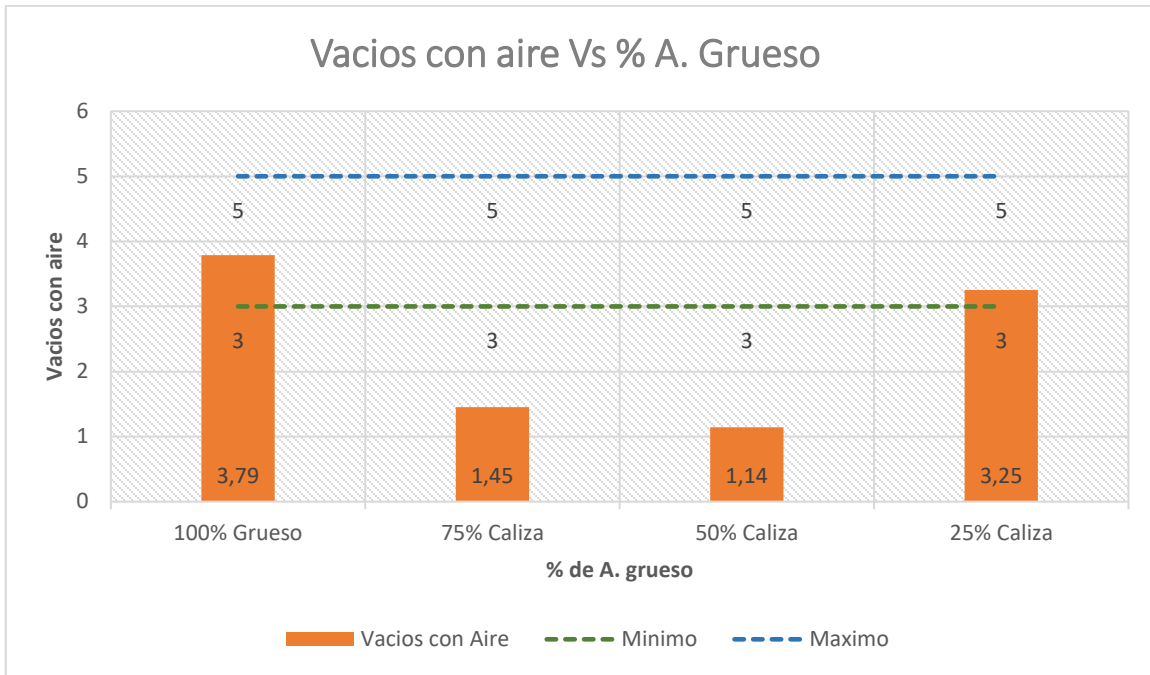


Ilustración 6.3. Vacíos con aire de la mezcla modificada.

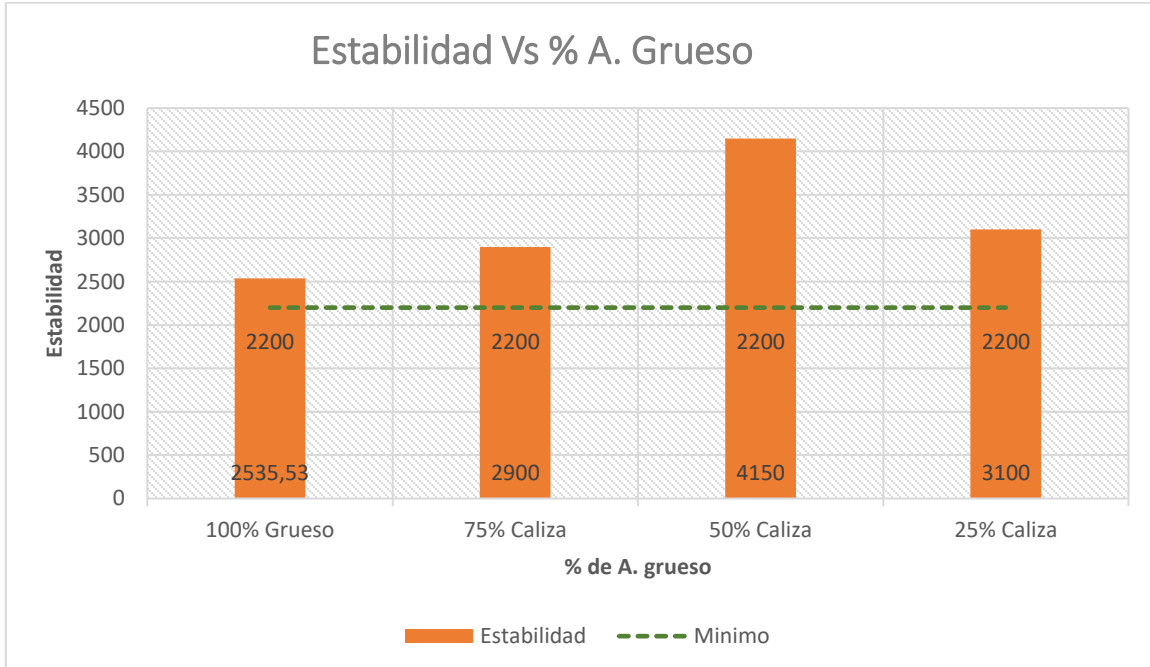


Ilustración 6.4. Estabilidad de la mezcla modificada.

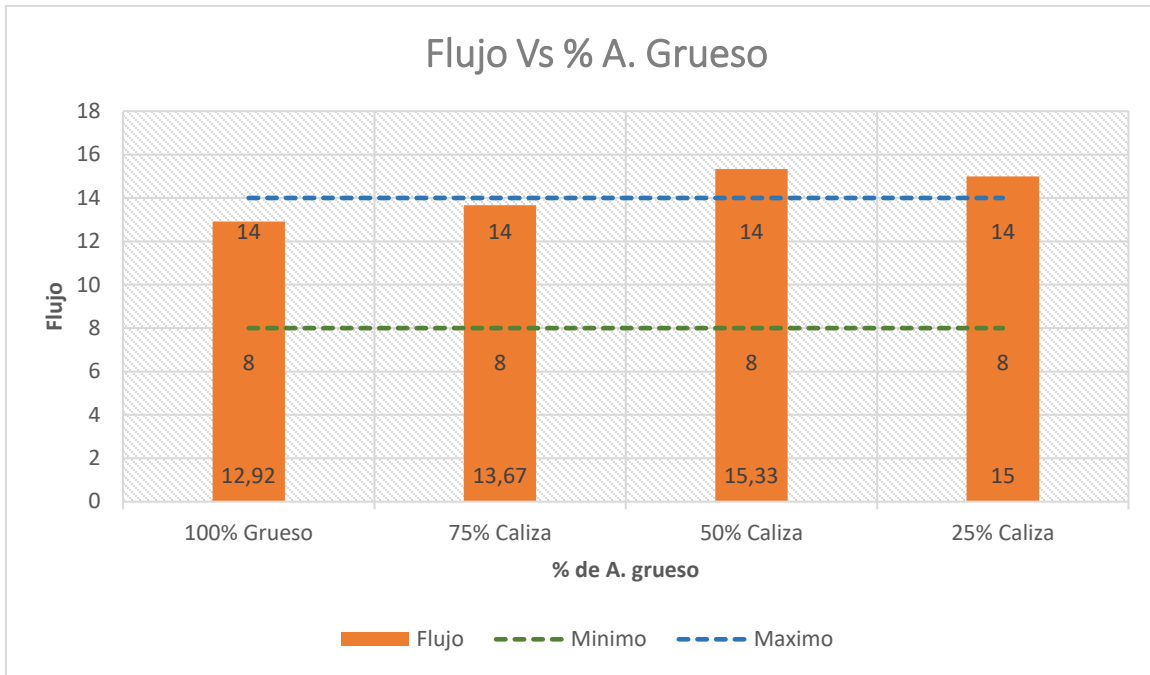


Ilustración 6.5. Flujo de la mezcla modificada.

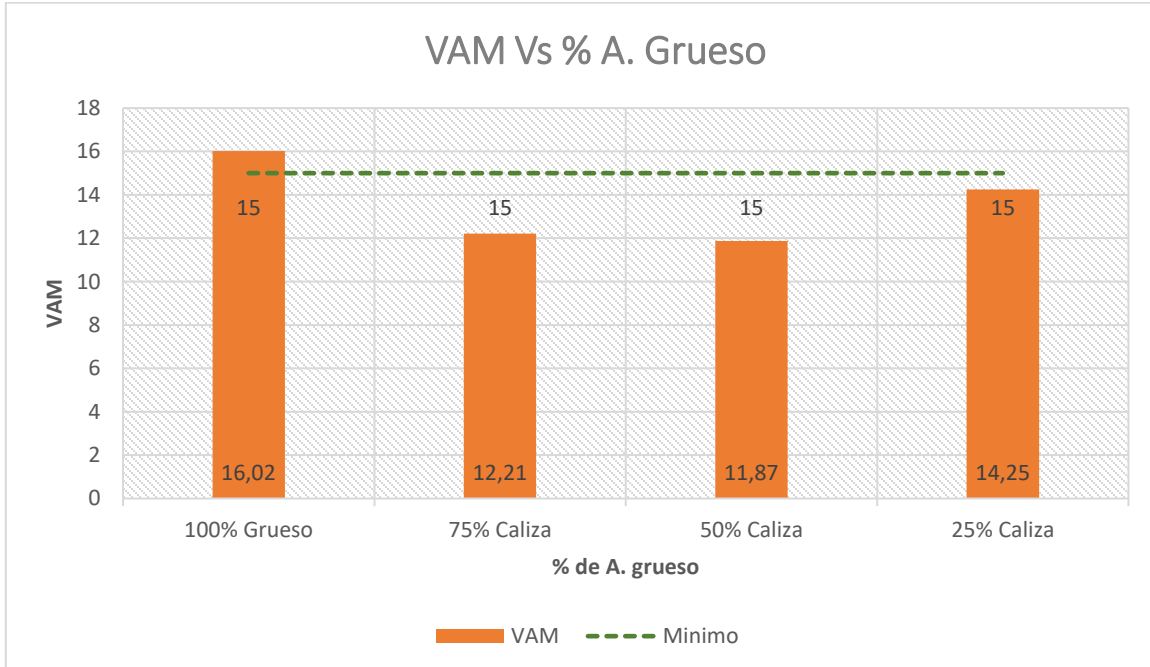


Ilustración 6.6. VAM de la mezcla modificada.

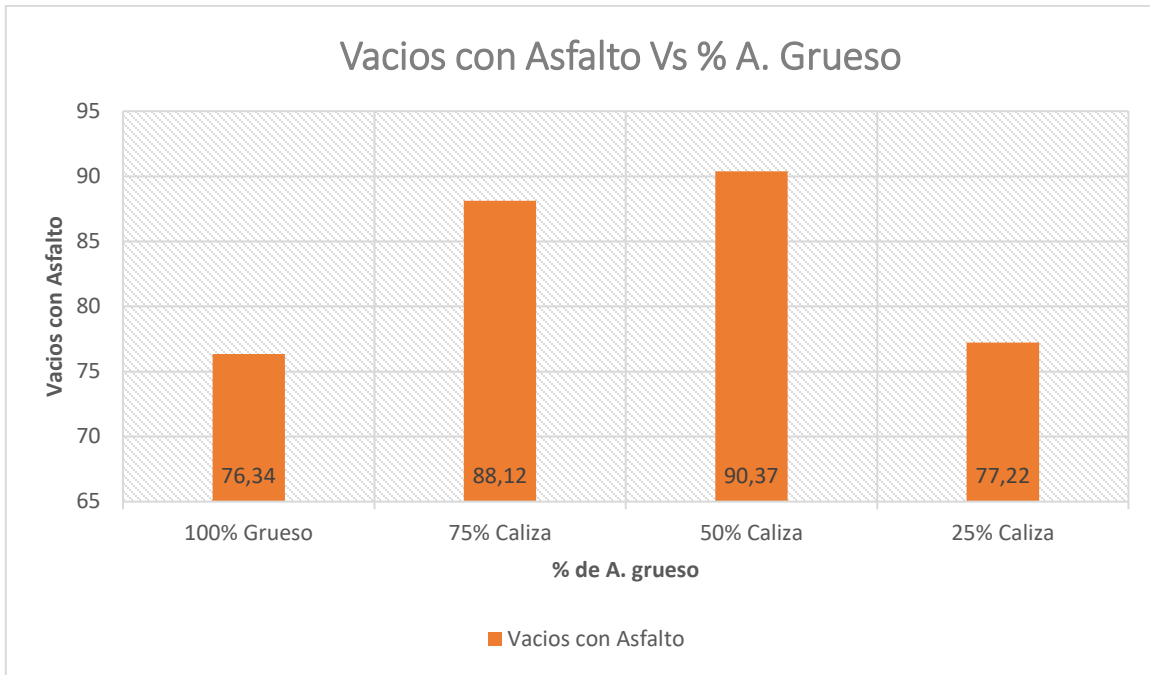


Ilustración 6.7. Vacíos con asfalto de la mezcla modificada.

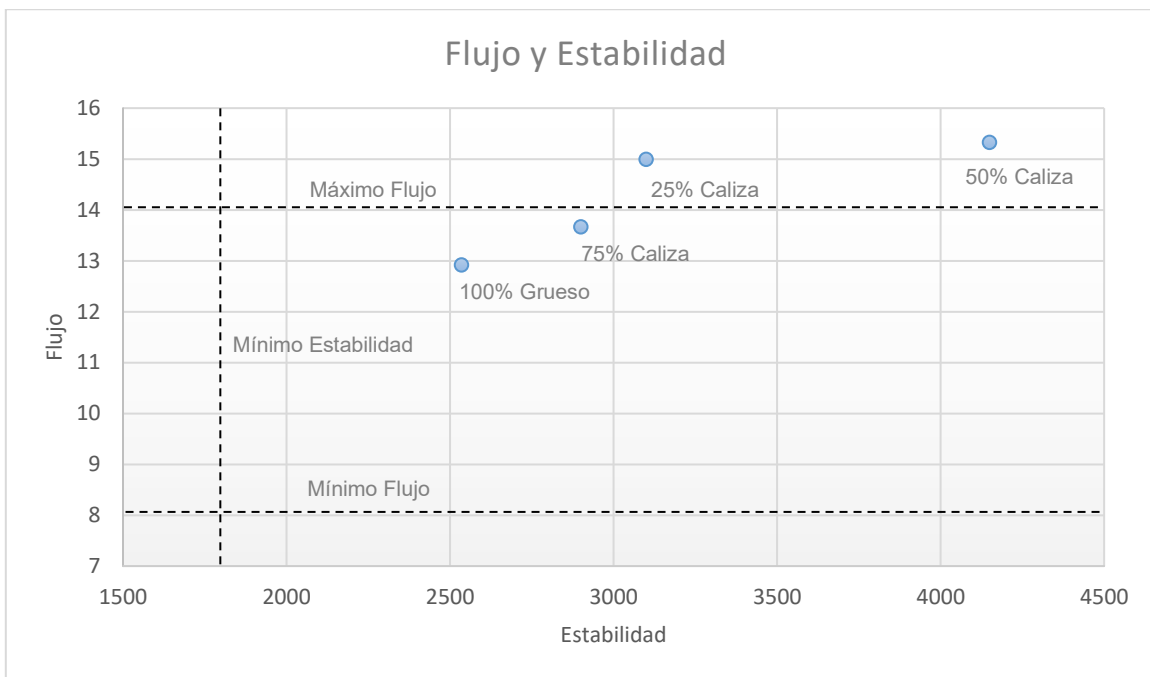


Ilustración 6.8. Flujo Vs estabilidad de la mezcla modificada.

7. CAPITULO 7. ANÁLISIS DE COSTOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

En todo proyecto de ingeniería es necesario conocer el costo o presupuesto de una obra para así poder distribuir de manera correcta los recursos necesarios y así no tener pérdidas cuando el proyecto se ejecute. En este capítulo se analizará el costo necesario para elaborar una mezcla asfáltica en caliente convencional y modificada con el objetivo de comparar las dos mezclas no solo por su desempeño si no también económicamente. Los costos son todos los gastos que se producen en una empresa con el fin de poder realizar las actividades que conforman un proyecto. El costo unitario de todo proyecto está conformado por los costos directos y los costos indirectos que dependen esencialmente de la relación que tienen con un producto o actividad.

7.1. Costos directos

Son aquellos costos que están direccionados a la realización y la producción de las obras de la construcción. Son los costos de materiales, equipos, mano de obra, es decir todos los costos que se encuentran físicamente en un rubro. Los costos directos cambian en relación a una actividad o a un volumen dado (Maila, 2013). Para los costos directos que serán analizados en este trabajo, se considera los costos de ensayos en laboratorio, y el transporte de los materiales desde las minas hasta un lugar determinado. Para la determinación de los costos de transporte se optará por asumir un proyecto vial de 250m de longitud, con 8 metros de ancho (dos carriles) y 0,2 metros de espesor de la carpeta asfáltica, con el fin de obtener la cantidad de metros cúbicos que se necesita para elaborar las mezclas asfálticas en caliente con las dosificaciones indicadas.

7.1.1. Costo directo de la mezcla convencional

Costo de ensayos de los agregados				
nombre del ensayo	unidad	# muestras	costo unitario	costo total
Análisis granulométrico	u	3	22,00	66,00
Abrasión del agregado grueso	u	1	40,00	40,00
Gravedad específica del agregado	u	2	14,50	29,00
Gravedad específica del agregado	u	1	27,00	27,00
Angularidad de partículas	u	2	14,50	29,00
Partículas planas y alargadas	u	1	40,00	40,00
Contenido de deletéreos	u	3	14,50	43,50
Resistencia a los sulfatos	u	3	72,00	216,00
TOTAL				490,50

Tabla 7.1. Costo de ensayo de los agregados para la mezcla convencional

Costo de ensayos del cemento asfáltico				
nombre del ensayo	unidad	# de muestras	costo unitario	costo total
Viscosidad absoluta a 60°C Muestra	u	1	55,00	55,00
Viscosidad absoluta a 60°C RTFO	u	1	55,00	55,00
Viscosidad cinemática	u	1	44,75	44,75
Penetración	u	1	12,00	12,00
Punto de ablandamiento	u	1	34,00	34,00
Punto de Inflamación copa de Cleveland	u	1	34,00	34,00
Ductilidad	u	1	27,25	27,25
Gravedad específica	u	1	27,00	27,00
RTFO Cambio de masa	u	1	66,75	66,75
Viscosidad rotatoria	u	1	44,50	44,50
TOTAL				400,25

Tabla 7.2. Costo del ensayo del cemento asfáltico.

Costo ensayo Marshall				
Nombre del ensayo	unidad	# de muestras	costo unitario	costo total
Diseño de mezclas asfálticas en caliente	u	1	1090,00	1090,00
TOTAL				1090,00

Tabla 7.3. Costo del ensayo Marshall para mezcla convencional

Dosificación para la mezcla	
Agregado grueso	20%
agregado intermedio	20%
agregado fino	60%

Tabla 7.4. Dosificación para la mezcla convencional.

Costo de transporte para el agregado						
Material	unidad	Cantidad (m3)	P. unitario	# Viajes	P. unitario	Costo
A. grueso mina Guayllabamba	viajes/m3	80	12	10	90	1860
A. intermedio mina Guayllabamba	viajes/m3	80	12	10	90	1860
A. fino mina Guayllabamba	viajes/m3	240	12	30	90	5580
TOTAL						9300

Tabla 7.5. Costo del transporte de agregados para la mezcla convencional

7.1.2. Costo directo para la mezcla asfáltica modificada

Costo de ensayos de los agregados				
nombre del ensayo	unidad	cantidad de muestras	C. unitario	C. total
Análisis granulométrico	u	4	22,00	88,00
Abrasión del agregado grueso	u	2	40,00	80,00
Gravedad específica del agregado	u	3	14,50	43,50
Gravedad específica del agregado fino	u	1	27,00	27,00
Angularidad de partículas	u	3	14,50	43,50
Partículas planas y alargadas	u	2	40,00	80,00
Contenido de deletéreos	u	4	14,50	58,00
Resistencia a los sulfatos	u	4	72,00	288,00
TOTAL				708,00

Tabla 7.6. Costo de ensayos de agregados para la mezcla modificada

Costo de ensayos del cemento asfáltico				
nombre del ensayo	unidad	# de muestras	costo unitario	costo total
Viscosidad absoluta a 60°C Muestra	u	1	55,00	55,00
Viscosidad absoluta a 60°C RTFO	u	1	55,00	55,00
Viscosidad cinemática	u	1	44,75	44,75
Penetración	u	1	12,00	12,00
Punto de ablandamiento	u	1	34,00	34,00
Punto de Inflamación copa de Cleveland	u	1	34,00	34,00
Ductilidad	u	1	27,25	27,25
Gravedad específica	u	1	27,00	27,00
RTFO Cambio de masa	u	1	66,75	66,75
Viscosidad rotatoria	u	1	44,50	44,50
TOTAL				400,25

Tabla 7.7. Costo del ensayo de asfalto para la mezcla modificada

Costo ensayo Marshall				
Nombre del ensayo	unidad	# de muestras	costo	costo total
Diseño de mezclas asfálticas en	u	1	1090,00	1090,00
TOTAL				1090,00

Tabla 7.8. Costo del ensayo de diseño Marshall para la mezcla modificada

Dosificación para la mezcla	
Agregado grueso	10%
Piedra caliza	10%
agregado intermedio	20%
agregado fino	60%

Tabla 7.9. Dosificación para la mezcla modificada.

Costo de transporte para el agregado						
Material	unidad	Cantidad (m3)	P. unitario	# Viajes	P. unitario	C. total
Piedra caliza mina cementera	viajes/m3	40	12	5	280	1880
A. grueso mina Guayllabamba	viajes/m3	40	12	5	90	930
A. Intermedio mina	viajes/m3	80	12	10	90	1860
A. Fino mina Guayllabamba	viajes/m3	240	12	30	90	5580
TOTAL						10250

Tabla 7.10. Costo del transporte de los agregados de la mezcla asfáltica modificada.

7.2. Costos indirectos

Los costos indirectos se refieren aquellos costos que no se encuentran especificados en el rubro y son necesarios para el funcionamiento de la constructora. Se dividen en costos indirectos de administración y costos indirectos de obra. Los costos indirectos de administración son aquellos que se refieren a todos los gastos que necesita la administración para funcionar como gastos arrendatarios, gastos para montar una oficina, etc. Los costos indirectos de obra se refieren a todos los gastos efectuados en la obra, principalmente los sueldos de los trabajadores.

Para este proyecto no se considerará los costos indirectos para la mezcla asfáltica ya que solo estaremos analizando el costo de los ensayos y el transporte.

7.3. Costo total

Como se mencionó anteriormente, el costo total de un proyecto se define como la suma del costo directo total más el costo indirecto total, valores que se obtuvieron en los subcapítulos 7.1 y 7.2 con la realización de los costos unitarios para cada una de las mezclas analizadas en esta investigación.

$$\text{costo total} = \text{costo directo} + \text{costo indirecto}$$

7.3.1. Costo total de la mezcla convencional

$$\begin{aligned} \text{costo total} = & \text{costo del ensayo de agregados} + \text{costos de ensayo del cemento asfáltico} \\ & + \text{costo de diseño Marshall} + \text{costo de transporte} + \text{costo indirecto} \end{aligned}$$

$$\text{costo total} = 490,5 + 400,25 + 1090 + 9300 + 0 = \$ \mathbf{11280,75}$$

7.3.2. Costo total de la mezcla modificada

$$\text{costo total} = \text{costo del ensayo de agregados} + \text{costos de ensayo del cemento asfáltico} \\ + \text{costo de diseño Marshall} + \text{costo de transporte} + \text{costo indirecto}$$

$$\text{costo total} = 708 + 400,25 + 1090 + 10250 + 0 = \$ \mathbf{12448,25}$$

8. Conclusiones.

- Durante la colocación, compactación y la vida útil de la mezcla asfáltica los materiales sufren desgaste, por lo que la norma exige que debe cumplir un determinado valor de abrasión, siendo este del 40 % para que estos puedan ser utilizados en obra. Los resultados de la abrasión en la piedra caliza resulto muy alto, con un valor de 44,72 % comparado con el 8,2 % del agregado grueso incumpliendo lo requerido en la norma, por lo que se optó en realizar una combinación del agregado grueso y piedra caliza en porcentajes. Por lo tanto, no se hizo el reemplazo total del grueso por la piedra caliza, pensado realizar desde un principio, modificando en el proceso de cálculos.
- La ductilidad RTFO dada en el asfalto fue de 46 cm en promedio, mientras que la norma NTE INEN 2515:2010, Tabla 7, Grado AC-20 RTFO aclara que el valor mínimo debe ser de 50 cm. Los asfaltos que presentan alta ductilidad suelen ser susceptibles respecto a elevadas temperaturas y por ende a altas deformaciones, sin embargo, posee buenas propiedades aglomerantes. Con el resultado obtenido se concluye que el asfalto utilizado en la mezcla genera gran endurecimiento durante el proceso de mezclado y compactación a causa del oxígeno.

- La viscosidad no cumplió dentro del rango establecido siendo de 160 a 240 Pa s, dándonos un valor de 285,56 Pa s, mayor al límite establecido. Eso se debe a que el asfalto tiene alto comportamiento elasto-plástico afectando al desempeño de la estructura de pavimento presentándose problemas de ahuellamiento en días que presentan temperaturas elevadas.
- La cantidad de partículas alargadas y planas juegan un papel importante al momento de la colocación de la mezcla en obra, por lo tanto, la norma MOP en la sección 811 específica que la cantidad máxima de partículas alargadas y planas debe ser del 10% para asegurar una buena trabajabilidad en obra. El agregado grueso y piedra caliza no cumplieron estas especificaciones ya que se obtuvo valores de 32,43 % y 34,72% de partículas alargadas respectivamente, y valores de 19,98 % para el agregado grueso y 19,72% para la piedra caliza de partículas planas.
- El análisis de costos se obtuvo considerando los gastos incluidos en la realización de ensayos de los materiales de las diferentes mezclas, el ensayo de diseño Marshall y el transporte de una cantidad considerada de materiales previstos. Los resultados obtenidos concluyen que el costo total de la mezcla modificada con piedra caliza como agregado grueso excede en un 9,38 % es decir, \$ 1207,50 del coste de la muestra convencional.
- El VAM no cumple en ninguna de las mezclas asfálticas modificadas, siendo el más próximo de 14,25% en la mezcla de 25% de piedra caliza incumpliendo el 15% necesario, produciendo una durabilidad baja de la carpeta asfáltica, presentado una apariencia seca, debido al endurecimiento rápido del asfalto. Todo esto genera una baja calidad del pavimento ya que se utilizó el porcentaje óptimo de asfalto, cumpliendo con la muestra convencional, no así agregando piedra caliza a las mezclas. Esto se debe a que el asfalto retiene por más tiempo las características de la mezcla asfáltica.

- Después del análisis de resultados obtenidos de la mezcla Marshall, con las ilustraciones 6.3 a la 6.8 podemos concluir que la mezcla más relevante es la mezcla que contiene 25% de material calizo, ya cumple con los vacíos con aire (3,25%) con un rango de 3% a 5%, la estabilidad (3100 lb) supera el valor de 2200 lb, siendo este de tráfico muy pesado, sin embargo, el flujo (15 in/100) no se encuentra dentro del rango de 8 a 14 in/100 siendo este superior, además el VAM mínimo es de 15% y se obtuvo 14,25%. Concluyendo que a pesar de cumplir con la mayoría de requisitos la mezcla de 25% de piedra caliza y 75% de agregado grueso no es apta para su realización.

9. Bibliografía

- Alamilla, H. D. (2006). *Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica*. Mexico DF.
- Arias, G. (10 de Abril de 2013). *Slideshare*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/leonel321/mezclas-asfalticas-2>
- Aristizabal. (2016). *Prezi*. Obtenido de <https://prezi.com/w3dbmskcf9d9/asfalto-liquido-y-emulsiones-asfalticas/>
- ASTM. (2010). Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens). *ASTM INTERNATIONAL*, 1.
- ASTM C125-07. (2018). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. *ASTM INTERNATIONAL*, 8.
- ASTM D5. (2013). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. *ASTM International*, 1.
- ASTM D70-03. (2003). Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method) . *ASTM International*, 1.
- EcuRed. (3 de Octubre de 2018). *EcuRed*. Obtenido de https://www.ecured.cu/Rocas_sedimentarias

- La Hora. (2008). Ibarra remendada. *La Hora*, pág. 1.
- Maila, M. (2013). *Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato*. Quito .
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). Agregados para Hormigón Asfáltico . En *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes* (pág. 772).
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2011). *Norma para materiales y ensayo de materiales* .
- Ministerio de Transportes y Obras Públicas. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12*. Quito.
- Montero, T. L., & Miró, R. (2015). El envejecimiento en mezclas asfálticas . *Cuadernos Tecnológicos de la PTC*, 65.
- MOP - 001-F . (2002). Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. *Tomo II*, 287.
- Salazar. (2011). *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos*. UCR.
- Salvador, P., & Salvador, J. (s.f.). *Manual Visualizado de ensayos para pavimentos*. Quito.
- Servicio Geológico Mexicano . (22 de Marzo de 2017). Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-igneas.html>
- Subiaga, A. (2005). EL ESTADO DEL ARTE DE MEDIDAS DE. 4.
- Universidad de las Américas Puebla. (2015). Capítulo 1: Estado del arte (Diseño de mezclas asfálticas). En M. Cáceres, *Diseño de mezclas asfálticas* (pág. 33).
- Vizcardo Otero , T., & Trinidad Santos , L. (2014). *Agregados para la construcción*. Lima.