

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE
UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE CON ADICIÓN DE COLILLAS
DE CIGARRILLO

SALAMANCA JUAN CAMILO
SILVA RAMOS VALENTINA

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2019

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE
UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE CON ADICIÓN DE COLILLAS
DE CIGARRILLO

SALAMANCA JUAN CAMILO
SILVA RAMOS VALENTINA

Trabajo de grado como opción de grado para optar al título de: INGENIERO CIVIL

Director de Trabajo de Grado
Ing. Harol León Zambrano Urbano

Codirector de Trabajo de Grado
Doc. Rafael Soto Espitia

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2019

CONTENIDO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
2. ANTECEDENTES	16
3. JUSTIFICACIÓN	18
4. OBJETIVOS	19
4.1. Objetivo General.....	19
4.2. Objetivos Específicos	19
5. MARCO DE REFERENCIA.....	20
5.1 MARCO CONCEPTUAL.....	20
5.2. MARCO NORMATIVO.....	23
5.2.1. Ensayo a los agregados pétreos	23
5.2.1.1. Muestreo y cuarteo (ASTM D 75)	23
5.2.1.2. Peso volumétrico (ASTM C 29/ C 29M -97)	23
5.2.1.3. Granulometría (ASTM C 136-01)	24
5.2.1.4. Densidad.....	25
5.2.1.5. Absorción	27
5.2.1.6. Equivalente de arena (ASTM D 2419 - 09)	28
5.2.1.7. Desgaste de los ángeles (ASTM C 131 - 03).....	29
5.3. ASFALTOS.....	31
5.3.1. Clasificación y grados de asfalto	31
5.3.2. Propiedades químicas del asfalto	31
5.3.3. Propiedades físicas del asfalto	32
5.3.4. Mezcla asfáltica	32

5.4. DISEÑO MARSHALL	33
5.4.1. Ensayo Marshall	33
5.4.2. Análisis de vacíos	34
5.4.3. Pastillas testigo	34
5.4.4. Contenido de asfalto	34
5.4.5. Contenido óptimo	35
6. METODOLOGÍA.....	36
6.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	36
6.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	36
6.3. FASES DE INVESTIGACIÓN.....	36
6.3.1. FASE 1.....	36
6.3.1.1. Extracción de los materiales	37
6.3.1.2. Pruebas a los materiales pétreos.....	38
6.3.2. FASE 2.....	41
6.3.2.1. Recolección de las colillas	41
6.3.2.2. Diseño de mezcla.....	41
6.3.3. FASE 3.....	44
6.3.4. FASE 4.....	46
6.3.4.1. Contenido óptimo.....	46
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS	47
7.1. PRUEBAS A LOS MATERIALES PÉTREOS.....	47
7.1.1. Extracción de materiales	47
7.1.2. Secado de material	48

7.1.3.	Peso volumétrico	49
7.1.3.1.	Peso volumétrico seco y suelto	49
7.1.3.2.	Peso volumétrico seco y varillado.....	50
7.1.4.	Granulometría	52
7.1.5.	Densidad.....	57
7.1.5.1.	Densidad para material grueso.....	57
7.1.5.2.	Densidad para material fino	60
7.1.6.	Absorción	61
7.1.6.1.	Absorción para material grueso	61
7.1.6.2.	Absorción para material fino	63
7.1.7.	Equivalente de Arena	64
7.1.8.	Desgaste de los Ángeles	65
7.2.	RECOLECCIÓN DE LAS COLILLAS DE CIGARRILLO	67
7.3.	PROPUESTA GRANULOMÉTRICA.....	68
7.4.	CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO.....	72
7.5.	CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO MEDIANTE EL MÉTODO ANALÍTICO 73	
7.6.	FABRICACIÓN DE PASTILLAS	75
7.7.	ANÁLISIS DEL METODO MARSHALL	78
8.	CONCLUSIONES.....	104
9.	RECOMENDACIONES.....	106
10.	BIBLIOGRAFÍA	107
11.	ANEXOS	109

LISTA DE IMAGENES

	Pág.
Imagen 1. Componentes de un cigarrillo.....	22
Imagen 2. Máquina de los ángeles.....	30

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Propuesta granulométrica.....	71
Gráfica 2. Estabilidad vs % de asfalto en pastillas testigo.....	81
Gráfica 3. Flujo vs % de asfalto en pastillas testigo.....	82
Gráfica 4. Peso unitario vs % de asfalto en pastillas testigo.	82
Gráfica 5. Vacíos vs % de asfalto en pastillas testigo.	83
Gráfica 6. VFA vs % de asfalto en pastillas testigo.	84
Gráfica 7. VMA vs % de asfalto en pastillas testigo.....	85
Gráfica 8. Estabilidad vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1	86
Gráfica 9. Flujo vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1.	87
Gráfica 10. Peso unitario vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1	88
Gráfica 11. Vacíos vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1	88
Gráfica 12. VFA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1	89
Gráfica 13. VMA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1	90
Gráfica 14. Estabilidad vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2	92
Gráfica 15. Flujo vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2	92
Gráfica 16. Peso unitario vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2.....	93
Gráfica 17. Vacíos vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2	94
Gráfica 18. VFA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2	94
Gráfica 19. VMA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2	95
Gráfica 20. Estabilidad vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3	97
Gráfica 21. Flujo vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3	98
Gráfica 22. Peso unitario vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3.....	98
Gráfica 23. Vacíos vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3	99
Gráfica 24. VFA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3	100
Gráfica 25. VMA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3	101

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Juego de mallas por material pétreo.	25
Tabla 2. Composición de la muestra y su carga abrasiva.	30
Tabla 3. Áreas superficiales de las partículas para diferentes fracciones del material pétreo.	42
Tabla 4. Índice asfáltico.	43
Tabla 5. Coeficiente asfáltico.	44
Tabla 6. Cantidades de relación cal-agua.	45
Tabla 7. Tabla resumen del peso volumétrico seco y suelto.	50
Tabla 8. Tabla resumen del peso volumétrico suelto varillado.	51
Tabla 9. Tabla resumen de la granulometría para la grava triturada.	53
Tabla 10. Tabla resumen de la granulometría para el sello triturado.	54
Tabla 11. Tabla resumen de la granulometría para arena triturada.	56
Tabla 12. Tabla resumen de la granulometría para arena volcánica.	57
Tabla 13. Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa cuando $\sum L \leq 10$	59
Tabla 14. Tabla resumen de la prueba de densidad de los materiales gruesos.	59
Tabla 15. Tabla resumen de la prueba de densidad de los materiales finos.	61
Tabla 16. Resumen de datos de la prueba de absorción de los materiales gruesos.	63
Tabla 17. Tabla resumen de la prueba de absorción de los materiales finos.	64
Tabla 18. Tabla resumen de la prueba de equivalente de arena.	65
Tabla 19. Tabla resumen de la prueba de desgaste de los ángeles.	67
Tabla 20. Tabla resumen de los porcentajes para la propuesta granulométrica.	68
Tabla 21. Granulometría grava triturada.	69
Tabla 22. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.	69
Tabla 23. Datos de la gráfica para la propuesta.	70
Tabla 24. Datos de propuesta.	72
Tabla 25. Cálculo para determinar el contenido mínimo de asfalto.	73
Tabla 26. Cálculo para determinar el contenido mínimo de asfalto mediante el método analítico.	74
Tabla 27. Cálculo para determinar la cantidad necesaria de material para 60 pastillas.	75
Tabla 28. Corrección de los valores de la estabilidad.	79
Tabla 29. Tabla resumen de cálculos del método Marshall para las pastillas testigo.	80
Tabla 30. Criterios para el diseño preliminar de una mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall.	80
Tabla 31. Vacíos en el agregado mineral (VMA) para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall.	85
Tabla 32. Tabla resumen de cálculos del método Marshall para las pastillas con modificación No. 1.	86
Tabla 33. Tabla resumen de resultados del contenido óptimo de asfalto.	91

Tabla 34. Tabla resumen de cálculos del método Marshall para las pastillas con modificación No. 2	91
Tabla 35. Tabla resumen de resultados del contenido óptimo de asfalto.	96
Tabla 36. Tabla resumen de cálculos del método Marshall para las pastillas con modificación No. 3	96
Tabla 37. Tabla resumen de resultados del contenido óptimo de asfalto.	102
Tabla 38. Tabla resumen de resultados del contenido óptimo de asfalto.	103

LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Banco de materiales “la Roka”.....	47
Foto 2. Recolección de cada uno de los materiales pétreos necesarios para el diseño de mezcla.....	48
Foto 3. Secado natural de materiales pétreos.....	48
Foto 4. Prueba de peso volumétrico seco y suelto.	49
Foto 5. Realización de los 25 golpes correspondientes según prueba peso volumétrico seco varillado.	50
Foto 6. Enrase de material según geometría de la tara.	51
Foto 7. Prueba de granulometría para la grava triturada.	52
Foto 8. Prueba de granulometría para la grava triturada.	52
Foto 9. Prueba de granulometría para el sello triturado.	54
Foto 10. Prueba de granulometría para la arena triturada.....	55
Foto 11. Prueba de granulometría para la arena volcánica.....	56
Foto 12. Prueba de densidad material grueso.	58
Foto 13. Prueba de densidad material grueso.	58
Foto 14. Prueba de densidad al material fino.....	60
Foto 15. Prueba de densidad al material fino.....	60
Foto 16. Prueba de absorción al material grueso.	62
Foto 17. Prueba de absorción al material grueso.	62
Foto 18. Prueba de absorción al material fino.....	63
Foto 19. Prueba de absorción al material fino.....	64
Foto 20. Prueba de equivalente de arena.	65
Foto 21. Prueba de desgaste de los ángeles.....	66
Foto 22. Prueba de desgaste de los ángeles.....	66
Foto 23. Recolección de colillas de cigarrillo.	67
Foto 24. Recolección de colillas de cigarrillo.	68
Foto 25. Total de pastillas ensayadas mediante el método Marshall.	76
Foto 26. Pastillas testigo ensayadas por el método Marshall.....	76
Foto 27. Pastillas con modificación No.1 ensayadas por el método Marshall.	77
Foto 28. Pastillas con modificación No.2 ensayadas por el método Marshall.	77
Foto 29. Pastillas con modificación No.3 ensayadas por el método Marshall.	78

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Estado del arte.....	109
ANEXO B. Resultados de laboratorio.....	109
ANEXO C. Registro fotográfico.....	109

RESUMEN

En esta investigación se presenta el proceso de diseño de una mezcla asfáltica densa en caliente con adición de colillas de cigarrillo, la cual tiene como objetivo evaluar las propiedades y el comportamiento de esta mediante el método Marshall. Adicionalmente se realizaron las diferentes pruebas a los materiales pétreos (grava, sello y arena) para su caracterización como: el muestreo y cuarteo, peso volumétrico, densidad y absorción, entre otras. Inicialmente, se determinó el contenido óptimo de asfalto, mediante una propuesta granulométrica, seguido del cálculo del contenido mínimo de asfalto para así desarrollar el proceso de la determinación del contenido óptimo de asfalto. Para las pastillas con modificación se realizaron varias adiciones entre colillas de cigarrillo, cal hidratada y agua, en diferentes cantidades teniendo como resultado 45 pastillas modificadas con el fin de observar el comportamiento de los especímenes y compararlo con un diseño de mezcla convencional de 15 pastillas testigo. Por último, se tiene como resultado que las pastillas modificadas presentan un mejor comportamiento en la mezcla asfáltica en comparación a una mezcla asfáltica convencional.

Palabras claves: mezcla asfáltica densa en caliente, colillas de cigarrillo, cal, método Marshall, desempeño, propiedades mecánicas.

INTRODUCCIÓN

Para la evaluación del diseño de una mezcla asfáltica se tienen en cuenta varios parámetros estipulados por las diferentes Normativas que lo rigen, sumado a esto las diferentes pruebas de laboratorio que se le deben realizar para verificar sus características y comportamiento tanto en laboratorio como *in situ*.

Gran parte de las colillas de cigarrillos, están hechas de acetato de celulosa, un termoplástico (tipo de plástico que se funde a altas temperaturas para poder moldearlo) y pueden albergar sustancias tóxicas como hidrocarburos policíclicos aromáticos, nicotina, arsénico y otros metales pesados¹. Un reporte de la ONG Ocean Conservancy, en el año 2017, indica que las colillas suponen el 13% del número total de desperdicios recogidos en su campaña mundial². Este resultado concuerda con los datos de consumo de tabaco: anualmente se fuman 6 billones de cigarrillos en todo el mundo y, de estos, 4.5 billones son depositados en espacios públicos³.

En esta investigación se realizó un diseño de mezcla asfáltica densa en caliente con adición de colillas de cigarrillo, las cuales al ser ensayadas a fuerzas de tensión tiene una gran resistencia a la presión como a la tracción, además, de que desarrollan gran flexibilidad. Por lo tanto, teniendo en cuenta estas características se mejoró las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente convencional y así, poder darle a este elemento no reutilizable y contaminante una nueva utilización en el campo de la ingeniería civil en el ámbito de las vías terrestres enfocado en el diseño de mezclas asfálticas.

Para la adición de las colillas de cigarrillo en una mezcla asfáltica, se buscó cubrir con un elemento que siga contribuyendo a mejorar las propiedades mecánicas; según la ANCADE (Asociación Nacional de Cales y Derivados de España)⁴ se ha demostrado que la cal hidratada es la referencia mundial de los modificadores de asfalto para mitigar el daño de la humedad y así ampliar la vida útil del pavimento ya que, reduce el índice de envejecimiento retardando la oxidación. Por lo tanto, el pavimento sigue siendo más flexible a lo largo del tiempo, y se protege del agrietamiento frágil durante más años.

¹ AMERICAN CANCER SOCIETY. Harmful Chemicals in tobacco Products. Disponible en internet: <https://www.cancer.org/cancer/cancer-causes/tobacco-and-cancer/carcinogens-found-in-tobacco-products.html>

² JONES Janis, Chief Executive Officer. Ocean Conservancy International Coastal Cleanup (ICC 2017 Report).

³ ELLI SLAUGHTER, Richard M Gersberg, et al. Toxicity of cigarette butts, and their chemical components, to marine and freshwater fish En: Press Release, 2011, vol. 20, p.25.

⁴ ANCADE. Cal hidratada Un aditivo probado para la durabilidad de los pavimentos asfálticos. En: EULA (European Lime Association. p.1-4.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad se han realizado varios estudios, donde se han incorporado diversos materiales residuales, como el vidrio, el plástico, corchos, material orgánico, entre otros, con el propósito de reutilizarlos en diferentes ámbitos de la ingeniería. Algunos de estos materiales al tener un proceso de descomposición largo, afecta a gran escala el medio ambiente, por lo que se consideran llamativos para su reincorporación en una cadena productiva. En el ámbito constructivo se han logrado avances en la implementación de estos residuos, encontrando resultados óptimos, logrando reducir los impactos ambientales que estos generan y mejorando las propiedades de algunos materiales.

Las colillas de cigarrillo son uno de los mayores desechos y contaminantes a nivel mundial, “se estima que 4.5 mil millones de colillas se desechan al año en el planeta, afectando así de manera importante los ecosistemas, tanto en la tierra como en el mar”⁵

Las colillas de cigarrillo a parte de su composición química, está compuesta por millones de fibras de celulosa que se encuentran apiladas entre sí, estas fibras de celulosa son biopolímeros compuestos de glucosa. Debido a esta característica, actualmente se han usado en diversos procesos constructivos como mezcla de concreto, muros divisorios, mezclas asfálticas y ladrillos. Las fibras de celulosa a una fuerza de tracción contemplan una gran resistencia y flexibilidad. Teniendo en cuenta estas propiedades se pueden incorporar en una mezcla asfáltica, como es el caso del investigador Dr. Abbas Mohajerani ⁶ de la Universidad RMIT en Australia quien encontró una solución a las colillas de cigarrillos al convertirlas en materia prima para la realización de una mezcla asfáltica en caliente, en esta publicación explica el proceso de adición de colillas de cigarrillo y como resultado se determinó que mejoran la resistencia, flexibilidad y reduce la cantidad de vacíos. En este estudio las colillas se usaron con su envoltura de papel y se recubrieron con parafina y asfalto, alterando el contenido óptimo de asfalto y por lo tanto algunas de sus propiedades.

Se propone reutilizar las colillas de cigarrillo sin papel envolvente y con otro recubrimiento, como la cal hidratada, que contribuya a mejorar las propiedades mecánicas del asfalto denso en caliente. Por lo tanto, se plantea la siguiente

⁵ JONES Janis, Chief Executive Officer. Ocean Conservancy International Coastal Cleanup (ICC 2017 Report)

⁶ MOHAJERANI Dr. Abbas. Physico mechanical properties of asphalt concrete incorporated with encapsulated cigarette butts. En: ELSEVIER Construction and Building Materials. Julio, 2017. vol.153, p.69-80.

pregunta de investigación: ¿Cómo es el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica densa en caliente al momento de adicionar colillas de cigarrillo recubiertas de diversos porcentajes de Cal hidratada y Agua?

2. ANTECEDENTES

Se realizó una revisión de 25 artículos de los cuales se seleccionaron 17 específicos sobre el tema tratado en la investigación. A continuación, se presentan cinco referentes que se consideraron de mayor aporte a esta investigación. En el anexo A, se relaciona un estado del arte de esta revisión.

En Austria, el investigador Dr. Abbas Mohajerani ⁷, realizó un estudio sobre la adición de colillas de cigarrillo en una mezcla asfáltica. En este proyecto las colillas de cigarrillo el único tratamiento que recibió fue de secado en horno. El procedimiento se realizó de dos formas, la primera cubriendo las colillas de cigarrillo con asfalto y la segunda cubriéndose con parafina. Las colillas que presentaron un mejor resultado fueron las que estaban con un asfalto de clase alta y mejoraba la resistencia y flexibilidad. Además, estas soportaron mayor carga que las de parafina; para la parafina se demostró que reduce el espacio de vacíos.

Por otra parte, la ANCADE (Asociación Nacional de Cales y Derivados de España) ⁸, realizó un artículo sobre las diferentes aplicaciones que se le puede dar a la Cal en la construcción tanto en infraestructura como en edificación; la Cal estabiliza y mejora las propiedades de los suelos arcillosos y de mezclas en caliente con el fin de aumentar la durabilidad.

En la University of Bojnord en Irán, los investigadores Sayyed Mahdi Abtahi, Mohammad Sheikhzadeh y Sayyed Mahdi Hejazi ⁹, determinaron dos métodos para la incorporación de fibras en la mezcla asfáltica. Uno se realizó con las fibras húmedas y el otro con las fibras secas, en el primero se mezcla las fibras húmedas con el cemento asfáltico antes de ser aplicado a la mezcla, a diferencia del proceso seco se mezcla las fibras con el agregado antes de la adición del asfalto, generalmente se realiza el proceso seco por la mayor facilidad de distribución de fibras en la mezcla, en cambio las fibras en húmedo pueden generar grumos entre ellas y burbujas a la mezcla. El adicionamiento de fibras a una mezcla presenta alta resistencia a la humedad, al envejecimiento, a la fatiga y al agrietamiento.

Otro estudio en Clemson University, en Estados Unidos, los investigadores Bradley J. Putman y Serji N. Amirkhania¹⁰, determinaron que las fibras de celulosa tienen un contenido alto de absorción con un efecto estabilizador, que puede atribuirse a la

⁷ Ibid., p. 69-80.

⁸ ANCADE. Cal viva. En: Asociación Nacional de Cales y Derivados de España. p. 1-7.

⁹ MAHDI ABTAHI, Sayyed Mohammad Sheikhzadeh y Sayyed Mahdi Hejazi. Fibre reinforced asphalt concrete A review. En: ELSEVIER Construction and Building Materials. Diciembre, 2009. vol.24, p.871-877.

¹⁰ PUTMAN Bradley J. Y Serji N. Amirkhania. Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures. En: Elsevier Resources, Conservation and Recycling. Febrero, 2004. vol.42, p.265-274.

naturaleza de absorción que tiene la celulosa en comparación a las fibras sintéticas de poliéster. El análisis de los resultados de tenacidad de las muestras secas y húmedas de una mezcla asfáltica indicó que la mezcla que contiene las fibras de celulosa tiene valores de dureza significativamente menores que las de neumático, alfombras y fibras de poliéster.

En la Universidad Politécnica de Valencia Escuela Superior de Gandía, los investigadores José Carlos Monzonis Marco y su director Juan Andrés González Romero¹¹ realizaron una tesis donde explica la composición química de una colilla de cigarrillo, además de su impacto ambiental. Mediante esta investigación resultó que los filtros de acetato de celulosa presentan abundante materia orgánica en ellos y se estipula que una mayor superficie de contacto proporcionada por el corte implicaba una mayor capacidad de retención en el momento de la absorción; las fibras de celulosa son capaces de retener ciertas cantidades de Zinc siempre y cuando la concentración inicial de éste sea apropiada para la cantidad de acetato de celulosa utilizado como adsorbente, esta cantidad absorbida se va soltando poco a poco.

¹¹ MONZONIS, José Carlos Marco y González Juan Andrés. Estudio para la minimización del residuo de colillas de tabaco y su posible reutilización. Trabajo de grado. Gandia. Universidad Politécnica De Valencia Escuela Superior De Gandia.2011. p. 80.

3. JUSTIFICACIÓN

El propósito de la investigación es presentar un estudio a partir del análisis de un material no aprovechado como lo son las colillas de cigarrillo, a través de las áreas de la ingeniería civil enfatizada en el área de pavimentos, con el fin de buscar la reutilización de este objeto, debido a que tiene una afectación de manera directa al campo ambiental y se considera un material no manejable; por consiguiente volviéndose una herramienta alterna para mejorar circunstancias de los elementos en la construcción, como lo es el diseño de una carpeta asfáltica.

Por medio de las colillas de cigarrillo se busca mejorar las propiedades mecánicas como lo es la estabilidad, flujo y resistencia a la tracción de una mezcla asfáltica; esto adicionando colillas de cigarrillo en un porcentaje calculado recubiertas de cal hidratada y agua, teniendo en cuenta que la cal ayuda a evitar el temprano envejecimiento de una mezcla asfáltica. Se establecerá este material para el diseño de mezcla con el fin de que en el momento de realizarle pruebas de laboratorio presente mejoras con respecto a una mezcla asfáltica convencional.

Otro propósito es convertir un residuo no aprovechable “todo material o sustancia que no ofrece ninguna posibilidad de aprovechamiento, reutilización o reincorporación a un proceso productivo. No tienen ningún valor comercial, por lo tanto, requieren disposición final” ¹², en un residuo aprovechable “cualquier material, objeto, sustancia o elemento que no tiene valor para quien lo genera, pero se puede incorporar nuevamente a un proceso productivo” ¹³.

¹² Decreto 1713. MINISTRO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Diario Oficial No. 44.893, de 07 de agosto de 2002. p.12.

¹³ Ibid., p. 12

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Evaluar las propiedades de una mezcla asfáltica densa en caliente por medio de la adición de colillas de cigarrillo con el fin de mejorar las características mecánicas.

4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los diferentes materiales pétreos para la realización de la mezcla asfáltica.
- Realizar los cálculos correspondientes para el diseño y elaboración de una mezcla asfáltica densa en caliente por el método Marshall.
- Determinar el contenido necesario de asfalto para la adición de colillas de cigarrillo, cubiertas por una capa de cal hidratada cuya variación va de 3.3, 5.0 y 6.6 g.
- Analizar el comportamiento de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica diseñada con la adición de colillas de cigarrillo, así como de una mezcla asfáltica de referencia.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO CONCEPTUAL

En la actualidad han surgido investigaciones con respecto a los diferentes desechos no biodegradables que están afectando de manera directa al medio ambiente en el cual se vive, para tener referencia de esto se presenta las colillas de cigarrillo, objeto el cual diversas ramas de la construcción se han puesto en la tarea de darle un uso a este desecho con el fin de contribuir a la mitigación del impacto que este genera en el ecosistema; y por otro lado, debido a sus facultades que tiene como: aislador de sonido, resistencia a la tracción y gran absorbente de fluidos; se busca incorporarlo en el ámbito constructivo como propósito de crear o mejorar procesos para su aplicación.

Para la utilización de este elemento como lo son las colillas de cigarrillo se buscó adicionarlo en una mezcla asfáltica densa en caliente. Para la recolección de los datos de la investigación se procedió como primer paso la recolección de las colillas, luego se realizó las pruebas a los materiales pétreos para su debida clasificación y con este proceder al diseño de mezcla asfáltica densa en caliente, para así realizar su desarrollo con el método Marshall.

5.1.1. Agregado

Agregado, también conocido como roca, material granular, o agregado mineral, es cualquier material duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. ¹⁴

5.1.1.1. Fuentes de Agregados

Los agregados usados en el pavimento asfáltico se clasifican, generalmente, de acuerdo a su origen. **Estos incluyen:** Agregados naturales, agregados procesados y agregados sintéticos o artificiales. ¹⁵

- **Agregados Naturales:** Los agregados naturales son aquellos que son usados en su forma natural, con muy poco o ningún procesamiento. Ellos están constituidos por partículas producidas mediante procesos naturales de erosión y degradación, tales como la acción del viento, el agua, el movimiento del hielo, y los químicos. ¹⁶

¹⁴ ASPHALT INSTITUTE. Principios de Construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de manuales No. 22 (MS-22). p.36.

¹⁵ Ibid., p. 37.

¹⁶ Ibid., p. 37.

- **Agregados Procesados:** Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados y tamizados antes de ser usados. Existen dos fuentes principales de agregados procesados: Gravas naturales que son trituradas para volverlas más apropiadas para pavimento de mezcla asfáltica, y fragmentos de lecho de roca y de piedras grandes que deben ser reducido en tamaño antes de ser usados en la pavimentación.¹⁷
- **Agregado Sintético:** Los agregados sintéticos o artificiales no existen en la naturaleza. Ellos son el producto del procesamiento físico o químico de materiales.

Los agregados sintéticos manufacturados son relativamente nuevos en la industria de la pavimentación. Ellos son producidos al quemar arcillas, arcilla esquistosa, tierra diatomácea, procesada, vidrio volcánico, escoria, y otros materiales.¹⁸

5.1.1.2. Propiedades del agregado y su evaluación

El agregado deberá poseer ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para un pavimento asfáltico de buena calidad, estas propiedades son:

- **Graduación y tamaño máximo de partículas:** Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezcla en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones.¹⁹
- **Limpieza:** La limpieza del agregado puede determinarse, usualmente, mediante inspección visual, pero un tamizado por lavado (donde el peso de la muestra de agregado antes de ser lavada es comparada con su peso después de ser lavada) proporciona una medida exacta del porcentaje de material indeseable más fino que 0.075 mm (No. 200).²⁰
- **Dureza:** Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación y durante la vida de servicio del pavimento. Los agregados que están en, o cerca de la superficie deben ser más duros (tener más resistencia) que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento.²¹

¹⁷ Ibid., p. 37.

¹⁸ Ibid., p. 39.

¹⁹ Ibid., p. 42.

²⁰ Ibid., p. 51.

²¹ Ibid., p. 51.

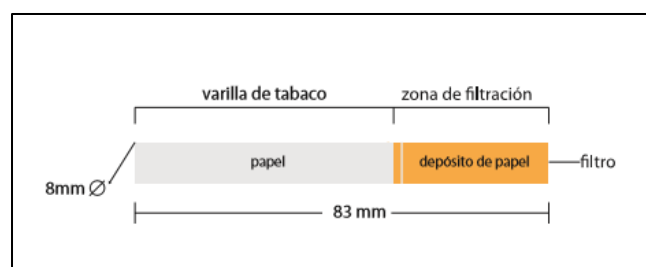
- **Capacidad de Absorción:** Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido en un baño determina su porosidad.²²
- **Forma de la Partícula:** La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida. La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida.²³
- **Textura Superficial:** La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento.²⁴

5.1.2. Colillas de cigarrillo (filtro del cigarrillo)

El filtro de los cigarrillos está constituido de acetato de celulosa, que se produce al hacer reaccionar la celulosa con el ácido acético. El acetato de celulosa es un material termoplástico relativamente duro y brillante, incoloro, transparente y amorfo con una buena claridad, estabilidad a los rayos UV y resistencia química moderadas.

El filtro fue concebido con una función principal, retener el alquitrán y el resto de productos perjudiciales, tanto los que lleva el tabaco como los producidos en la combustión del cigarrillo, antes de que lleguen a los pulmones de los fumadores.²⁵

Imagen 1. Componentes de un cigarrillo.



Fuente: Sistema para el adecuado desecho de colillas de cigarrillo²⁶

²² Ibid., p. 53.

²³ Ibid., p. 52.

²⁴ Ibid., p. 53.

²⁵ MONZONIS, José Carlos. Estudio para la minimización del residuo de colillas de tabaco y su posible reutilización. Trabajo final de carrera. Gandia: Universidad politécnica de valencia escuela politécnica superior de Gandia. I.T Forestas Esp. Explotación forestal, 2011. P. 5.

²⁶ GUEVARA, Lizano Alexa. Sistema para el adecuado desecho de colillas de cigarrillo. Optar el título de ingeniera en diseño industrial. Cartago: Instituto tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería en Diseño industrial. 2010. p.9.

5.1.3. Cal

Óxido de calcio alcalino y de color blanco, obtenido a partir de la calcinación de la piedra Caliza, se usa mezclándola con agua y pigmentos para preparar pinturas o bien mezclándola con arena para preparar morteros.²⁷

5.2. MARCO NORMATIVO

5.2.1. Ensayo a los agregados pétreos

Los materiales pétreos deberán pasar por una serie de ensayos que determinan su calidad.

5.2.1.1. Muestreo y cuarteo (ASTM D 75)²⁸

- **Muestreo:** Este método de ensayo presenta técnicas para el muestreo de los agregados finos y gruesos con los siguientes objetivos: Investigación preliminar de la fuente potencial de abastecimiento, control del producto en la fuente de abastecimiento, control de las operaciones en la obra para el uso, y aceptación o rechazo de los materiales.

5.2.1.2. Peso volumétrico (ASTM C 29/ C 29M -97)²⁹

- **Peso Volumétrico seco y suelto:** Esta prueba permite determinar las masas volumétricas de los materiales para terracerías, es decir, la relación masa - volumen en diferentes estados.

Equipo:

- Se necesita un recipiente de forma cilíndrica con capacidad de 10 lb, con diámetro inferior de 25 cm.
- Balanza con capacidad de 20 Kg y aproximación de 5 g.

²⁷ CONSTRUMATICA. Definición de cal. Arquitectura, ingeniería y construcción. Portal, buscador y comunidad. Disponible también en: <https://www.construmatica.com/construpedia/Cal>.

²⁸ American Society for Testing and Materials. Muestreo de agregados. ASTM D75. Estados Unidos de América, p.1.

²⁹ American Society for Testing and Materials. Método de prueba estándar para densidad de masa (peso unitario). ASTM C 29/C 29M-97. Estados Unidos de América, 2008-2009. p.1.

- Cucharón de 25 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, lleva acoplado un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo. ³⁰

NOTA: Para realizar la prueba de masa volumétrica seco y varillado se requieren los mismos equipos que el ensayo de masa volumétrica seco y suelto, con la diferencia de que en esta se requiere de una varilla metálica lisa con punta redondeada.

5.2.1.3. Granulometría (ASTM C 136-01) ³¹

Esta prueba permite determinar la composición por tamaños de las partículas del material pétreo empleado en una mezcla asfáltica, mediante su paso en una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con las aberturas más grandes, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo para así obtener la masa que se retiene en cada malla, calcular el porcentaje respecto al total y definir la masa que pasa. En esta prueba solo se registra el peso retenido en cada malla según corresponda al material que se le está haciendo la prueba de granulometría.

Equipo:

- Juego de mallas con alambre de bronce o acero de diversos calibres tejidos en forma de cuadrícula. La distribución de mallas se muestra en la tabla 1.

³⁰ Ibid., p. 2.

³¹ American Society for Testing and Materials. Método de prueba estándar para análisis de tamiz de agregados finos y gruesos ASTM C 136 - 01. Estados Unidos de América. p.1.

Tabla 1. Juego de mallas por material pétreo.

MALLAS		
Arena	Sello	Grava
No.4	½"	2"
No.10	⅜"	1 ½"
No.20	¼"	1 ¼"
No.40	No.4	1"
No.60	Pasa No.4	¾"
No.100		½"
No.200		⅜"
Fondo		¼"

Fuente: ASTM C 136-01.

- Balanza con capacidad de 2 kg y aproximación de 0,1 g .
- Recipientes de lámina galvanizada de forma rectangular aproximadamente de 40 x 70 x 20 cm.
- Tapas para el juego de mallas de forma circular.
- Cucharon de acero Galvanizado.
- Horno. ³²

5.2.1.4. Densidad

Esta prueba permite determinar la densidad relativa de los materiales pétreos empleados en mezcla asfáltica con el fin de conocer la masa de sólidos por unidad de volumen de dicho sólido sin vacíos en cada una de sus fracciones.

- **Densidad en arenas (ASTM C 128 - 01)** ³⁴: La prueba para arena con finos consiste en eliminar el aire atrapado en la muestra de prueba, al estar sumergida totalmente en agua destilada en ebullición para obtener su densidad relativa.

³² Ibid., p. 2.

³⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino ASTM C 128 - 01. Estados Unidos de América. p.1.

Equipo:

- Balanza con capacidad de 1 kg o más y precisión de 0,1 g o menos, y exactitud de 0,1%.
- Un picnómetro apropiado dentro del cual los agregados finos de la muestra de prueba pueden ser fácilmente introducidos y en el cual el volumen contenido puede ser reproducido dentro de 0,1 cm³.
- Un matraz Le Chatelier.
- Molde y un pisón para pruebas de humedad superficial: El molde debe tener la forma de cono truncado con las siguientes dimensiones: 40 (±) 3 mm de diámetro interior en la parte superior, 90 (±) 3 mm de diámetro interior en la parte inferior, y 753 mm de altura, el metal debe tener un espesor mínimo de 0,8 mm. El pisón debe tener una masa de 340 (±) 15 g y una superficie circular en la cara de apisonamiento de 25 (±) 3 mm de diámetro.

Formula:

$$SH = A/(B + S - C)$$

- **A** = masa del espécimen secado al horno.
 - **B** = masa del picnómetro lleno con agua hasta la marca de calibración, g.
 - **C** = masa del picnómetro lleno con el espécimen y agua hasta la marca de calibración, g.
 - **S** = masa del espécimen saturado y superficialmente seco, g.³⁵
- **Densidad en gravas (ASTM C 127 - 01):** Esta prueba consisten en introducir la muestra de prueba en un depósito de agua destilada, para determinar el volumen que desplaza, después, comparar con dicho volumen de masa seca de la muestra de prueba, obtener su masa por unidad de volumen y finalmente comparar con la densidad de agua, para obtener su densidad relativa.³⁶

Equipo:

- Probeta graduada de 250 cm³ de capacidad y aproximación de 1 cm³.
- Balanza.
- Picnómetro tipo sifón metálico de 163 mm de diámetro y 370 mm de altura con un sifón colocado a 250 mm de su base.

Ecuación:

$$\text{Densidad Grava} = A / (B - C)$$

³⁵ Ibid., p. 3.

³⁶ American Society for Testing and Materials. Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso ASTM C 127 - 01. Estados Unidos de América. p.1.

- **A** = masa del espécimen secado al horno.
- **B** = masa de la muestra de prueba de superficie saturada en aire, g.
- **C** = masa de la muestra de prueba saturada en agua, g.

5.2.1.5. Absorción

Se conoce como absorción, al incremento en masa del agregado pétreo debido a la penetración de agua en los poros de las partículas, durante un período de tiempo prescrito, sin incluir el agua adherida en la superficie de las partículas, expresado como porcentaje de la masa seca.

- **Absorción agregado fino (ASTM C 128 - 01)**³⁸: Para la determinación de la absorción, una porción separada de 500 (±) 10 g de agregado fino saturado superficialmente seco, se seca a masa constante y se determina la masa seca.

Equipo:

- Balanza de 1 kg de capacidad o más y precisión de 0,1 g o menos, y exactitud de 0,1% de la carga de prueba para cualquier punto dentro del rango de uso para este método.
- Molde y un pisón para pruebas de humedad superficial: El molde debe tener la forma de cono truncado con las siguientes dimensiones: 40 (±) 3 mm de diámetro interior en la parte superior, 90 (±) 3 mm de diámetro interior en la parte inferior, y 75 (±) 3 mm de altura, el metal debe tener un espesor mínimo de 0,8 mm. El pisón debe tener una masa de 340 (±) 15 g y una superficie circular en la cara de apisonamiento de 25 (±) 3 mm de diámetro.

Ecuación:

$$\text{Absorción \%} = [(S - A) / A] \times 100$$

Donde:

- **S** = masa del espécimen saturado y superficialmente seco en g.
- **A** = masa del espécimen secado al horno en g.³⁹
- **Absorción agregado grueso (ASTM C 127 - 01)**: Una muestra de agregado se sumerge en agua durante 24h para llenar esencialmente los poros. Luego se retira del agua, se seca el agua de la superficie de las partículas y se determina la masa. Finalmente, la muestra se seca al horno y se determina la masa. Usando los valores

³⁸ Ibid., p. 3.

³⁹ Ibid., p. 5.

de masa así obtenidos y las ecuaciones en este método de prueba, es posible calcular la absorción.⁴⁰

Equipo:

- Contenedor de muestras.
- Depósito de agua.
- Vidrio de reloj.

Ecuación:

$$\text{Absorción, \%} = [(B - A) / A] \times 100$$

Donde:

- **B** = masa de la muestra de prueba de la superficie saturada en aire, g.
- **A** = masa de la muestra de prueba secada al horno en aire, g.⁴¹

5.2.1.6. Equivalente de arena (ASTM D 2419 - 09)⁴²

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por tamiz No.4.

Equipo:

- Probeta graduada de 30 (±) 1 mm de diámetro interior y aproximadamente 400 mm de alto, graduado en milímetros hasta una altura de 380 mm (o graduada en mililitros hasta una capacidad de 270 ml) y provisto de un tapón hermético de caucho.
- Pisón compuesto por una varilla de bronce de 6 mm de diámetro y 450 mm de largo, con hilo en ambos extremos. un pie de bronce troncocónico, de 25 mm de diámetro basal y 20 mm de altura, con una perforación central con hilo para conectarlo a la varilla.
- Sifón compuesto por una botella de aproximadamente 4 l, provista de un tapón de caucho con dos perforaciones.
- Tamiz de tela de alambre y abertura cuadrada, de 4,75 mm (N.º 4) de abertura nominal.
- Recipiente de capacidad igual o mayor que 4 l para preparar el reactivo y la solución de ensayo.
- Agitador mecánico con un desplazamiento horizontal de 200 (±) 2 mm y una velocidad de agitación de 175 (±) 2 ciclos/min.

⁴⁰ American Society for Testing and Materials. Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso ASTM C 127 - 01. Estados Unidos de América. p.2.

⁴¹ Ibid., p. 4.

⁴² American Society for Testing and Materials. Método de prueba estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregados finos ASTM D 2419 - 09. Estados Unidos de América. p.1.

- Herramientas y accesorios como embudos, botellas para reactivos, regla de enrase, etc.
- Solución de trabajo de 240 g de cloruro de calcio anhidro, grado técnico, 1.085 g de glicerina farmacéutica, 25 g de formaldehído (solución 40% de volumen / volumen).

43

Ecuación:

$$EA (\%) = (Na / Nt) \times 100$$

Donde:

- **EA** = equivalente de arena (%).
- **Na** = nivel superior de la arena (mm).
- **Nt** = nivel superior de la arcilla (mm).⁴⁴

5.2.1.7. Desgaste de los ángeles (ASTM C 131 - 03)

Este método de prueba cubre un procedimiento para tamaños de agregado grueso menor que 37,5 mm. Esta prueba es una medida de la degradación del agregado mineral cuya combinación de acciones incluyen la abrasión o desgaste, impacto, y molienda en un tambor de acero giratorio que contiene un número indicado de esferas de acero, el número depende de la clasificación de la muestra de ensayo.⁴⁵

Equipo⁴⁶:

- La máquina de los Ángeles está constituida por un cilindro cerrado en ambos extremos el cual consta de un diámetro interior de 711 (±) 5 mm y una longitud interior de 508 (±) 5 mm, montado sobre dos soportes ubicados en el centro de sus caras paralelas, que le permiten girar sobre su eje de simetría en posición horizontal con una velocidad angular de 30 a 33 revoluciones por minuto.

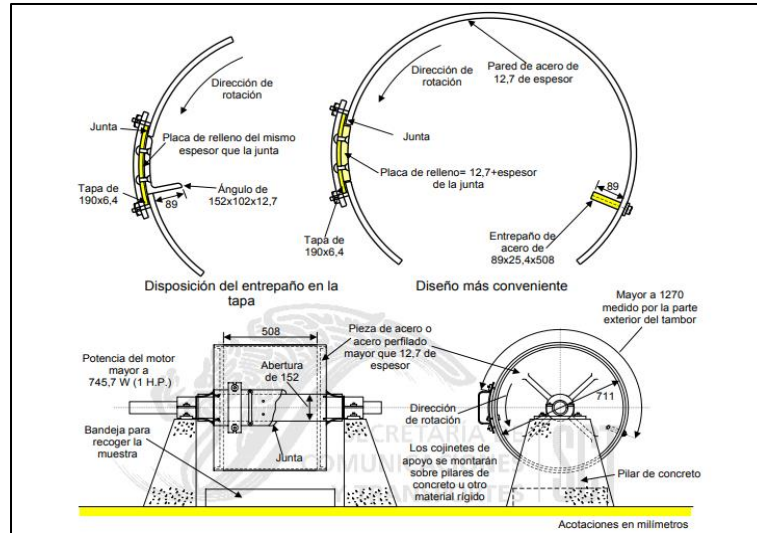
⁴³ Ibid., p. 2.

⁴⁴ Ibid., p. 8.

⁴⁵ American Society for Testing and Materials. Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación del agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles ASTM C 131 - 03. Estados Unidos de América. p.1.

⁴⁶ Ibid., p. 2-3.

Imagen 2. Máquina de los ángeles.



Fuente: IMT (Instituto Mexicano de Transporte)⁴⁷

- Juego de tamiz No. 12 (1,7 mm de abertura).
- Horno.
- Carga abrasiva de hierro fundido o acero, con un diámetro promedio de 47mm y una masa entre 390 y 445 g cada una. Para ver la composición de la muestra con la carga. Ver tabla 2.
- Balanza.
- Cucharón.

Tabla 2. Composición de la muestra y su carga abrasiva.

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37,5 - 25	1½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	⅜" - ¼"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	¼" - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

Fuente: IMT (Instituto Mexicano de Transporte) ⁴⁸

⁴⁷ INSTITUTO MEXICANO DE TRANSPORTE. Desgaste mediante la prueba de los ángeles de materiales pétreos para mezcla asfáltica M-MMP-4-04-006/02. México, p.1.

⁴⁸ Ibid., p. 4.

Formula:

Calcular la pérdida (diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra de prueba) como un porcentaje de la masa original de la muestra de prueba. Se informa este valor como el porcentaje de pérdida.⁴⁹

$$\text{Desgaste por trituración de los ángeles} = \left(\frac{\text{Masa inicial de la muestra de prueba}}{\text{Masa final del material de la muestra de prueba mayor que malla No 12}} \right) \times 100$$

5.3. ASFALTOS

El asfalto es un material de color negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia entre sólido y semisólido, a temperaturas normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente.⁵⁰

5.3.1. Clasificación y grados de asfalto

Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales los cuales son: cemento asfáltico, asfalto diluido y asfalto emulsificador.⁵¹

5.3.2. Propiedades químicas del asfalto

Básicamente el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunos trazos de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfáltenos y máltenos.⁵²

- **Asfáltenos:** No se disuelven en heptano, estos una vez separados de los máltenos son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso del grafito. Los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza.
- **Máltenos:** Se disuelven en heptano, son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites.

⁴⁹ Ibid., p. 3.

⁵⁰ ASPHALT INSTITUTE. Principios de Construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de manuales No. 22 (MS-22). p.10.

⁵¹ Ibid., p. 16.

⁵² Ibid., p. 16.

- **Resinas:** Las resinas son por lo general líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, estas proporcionan las cualidades de adhesividad (pegajosidad) del asfalto.
- **Aceites:** son de color claro y actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas.⁵³

5.3.3. Propiedades físicas del asfalto

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.⁵⁴

- **Durabilidad:** Durabilidad es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.
- **Adhesión y cohesión:** Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.
- **Susceptibilidad a la temperatura:** Todos los asfaltos son termoplastos esto hace referencia a que se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta.⁵⁵
- **Endurecimiento y Envejecimiento:** Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándolo con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).⁵⁶

5.3.4. Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica es una combinación de cemento asfáltico y agregados pétreos en proporciones exactas y previamente especificadas. Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades y características de la mezcla. Las mezclas asfálticas se pueden fabricar en caliente o en frío, siendo más comunes las primeras.⁵⁷

⁵³ Ibid., p. 17.

⁵⁴ Ibid., p. 17.

⁵⁵ Ibid., p. 18.

⁵⁶ Ibid., p. 20.

⁵⁷ Asociación de productores y pavimentadores asfálticos en Colombia. Cartilla del pavimento asfáltico. La mezcla asfáltica. Bogotá. Editado por ASOPAC, 2004. p.20.

La mezcla asfáltica cuenta con una variedad de características las cuales son:

- **Estabilidad:** Es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta ahuellamientos, corrugaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.
- **Durabilidad:** Es la capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito, que se observa en desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.
- **Impermeabilidad:** Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento.
- **Flexibilidad:** Es la capacidad del pavimento para acomodarse sin agrietamientos, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante.
- **Resistencia a la fatiga:** Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse.
- **Resistencia al deslizamiento:** Capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada.⁵⁸

5.4. DISEÑO MARSHALL

El propósito del método Marshall es determinar el contenido de asfalto óptimo para una combinación durante la construcción del pavimento. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.⁵⁹

El método Marshall usa muestras normalizadas de prueba (probetas) de 64 mm (2.5 pulgadas) de espesor por 102 mm (4 pulgadas) de diámetro. Una serie de 18 probetas, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas asfálticas de agregado. Los dos datos más importantes del diseño de mezcla del método Marshall son: un análisis de la relación de vacíos - densidad, y una prueba de estabilidad - flujo de las muestras compactadas.⁶⁰

5.4.1. Ensayo Marshall

Existen tres procedimientos en el método del ensayo Marshall. Estos son:

⁵⁸ Ibid., p. 21.

⁵⁹ ASPHALT INSTITUTE. Op. cit., p. 70.

⁶⁰ ASPHALT INSTITUTE. Op. cit., p. 77.

- **Determinación peso específico total:** El peso específico de cada probeta se determina tan pronto como las probetas recién compactadas hayan enfriado a la temperatura ambiente. Esta medición de pesos específicos es esencial para un análisis preciso de densidad - vacío.
- **Medición de estabilidad y fluencia:** El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.
- **Análisis de Densidad y vacíos:** Una vez que se completan los ensayos de estabilidad y fluencia, se procede a efectuar un análisis de densidad y vacíos para cada serie de probetas de prueba. El propósito del análisis es el de determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada.⁶¹

5.4.2. Análisis de vacíos

- **VMA (Vacíos en el agregado mineral):** Volumen intergranular de vacíos entre partículas del agregado de una MAC compactada (incluye vacíos de aire y el volumen de asfalto efectivo). Se expresa como porcentaje del volumen total del espécimen.
- **VFA (Porcentaje de vacíos llenados con asfalto):** Es la fracción de los vacíos entre agregados minerales que contiene ligante asfáltico. Se expresa como porcentaje de los vacíos entre agregados minerales o VMA. Estos representan el volumen de asfalto efectivo presente en la mezcla.⁶²

5.4.3. Pastillas testigo

Se define como una mezcla de diseño frecuentemente necesaria de prueba con el fin de encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos.⁶³

5.4.4. Contenido de asfalto

Es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla.⁶⁴

⁶¹ ASPHALT INSTITUTE. Óp. cit., p. 75.

⁶² INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Análisis volumétrico de mezcla asfáltica compactada en caliente I.N.V. E – 799 - 07. Colombia. p.2.

⁶³ SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTE. Aspectos de diseño volumétrico de mezclas asfálticas. ISO 9001:2000. Sanfandila, Oro: 2004. p.6.

⁶⁴ ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES Y PAVIMENTADORES ASFÁLTICOS DE COLOMBIA. Cartilla del pavimento asfáltico. p.21

5.4.5. Contenido óptimo

El contenido de diseño de asfalto en la mezcla final de pavimentación se determina a partir de resultados, primero, determinar el contenido de asfalto para un determinado contenido de vacíos, luego se evalúa las propiedades calculadas y medidas para ese contenido de asfalto y compararlas con los criterios de diseño. Si se cumplen los criterios, este es el contenido de diseño de asfalto. Si no se cumplen todos los criterios, será necesario hacer algunos ajustes o volver a diseñar la mezcla. ⁶⁵

⁶⁵ ASPHALT INSTITUTE. Principios de Construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de manuales No. 22 (MS-22). p.81.

6. METODOLOGÍA

6.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, debido a que todo el proceso de la investigación se basa en la recolección de datos en las diferentes etapas que tiene el diseño de mezcla densa en caliente, además de ser numéricos, exigen de un cálculo respectivo para el análisis de cada uno de ellos.

El enfoque cuantitativo tiene como inicio la delimitación de la intervención que se realizará en el diseño de mezcla, teniendo en cuenta el alcance al cual se llegará, parte de la identificación de unos objetivos y una pregunta de investigación, se hace la revisión literaria correspondiente a la información necesaria para la construcción de un marco de referencia; posteriormente se realiza un diseño de mezcla con el fin de responder a las variables que se desean analizar; finalmente, se estudian los resultados del diseño y se extraen las conclusiones.

6.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo experimental puesto que se realiza con parámetros científicos, el contexto en el que se realiza es de laboratorio, es decir que las condiciones son controladas para así otorgar mayor confiabilidad en los resultados.

La manipulación de variables independientes tiene como objetivo ser analizadas con el fin de observar su respuesta con respecto a las variables dependientes. Debido a las variables dependientes que se manejan como espera de los resultados finales para su posible conclusión, se encuentran la estabilidad, flujo, contenido de vacíos y contenido óptimo de asfalto, para la variable independiente se encuentra la cal y la más relevante como lo es el contenido efectivo de colillas de cigarrillo

6.3. FASES DE INVESTIGACIÓN

6.3.1. FASE 1

El proceso de la investigación consiste en la realización de un diseño de mezcla asfáltica densa en caliente con la adición de colillas de cigarrillo; en primer estancia, para inicios de desarrollo se dirigió a un banco de materiales con el fin de seleccionar los diferentes agregados que componen el diseño de mezcla, se seleccionan las cantidades necesarias

de grava triturada, sello triturado, arena triturada y arena volcánica; posteriormente se llevan al laboratorio y se les realiza un proceso de secado natural, este proceso consiste en extender el material en una zona abierta y realizar movimientos constantes durante dos horas y posteriormente a su debido secado se le realizan los ensayos de laboratorio, como lo son:

6.3.1.1. Extracción de los materiales

Para la extracción de los materiales pétreos fue necesario dirigirse a un banco de materiales ubicado en la vía Morelia-Salamanca a la altura de Cuto llamado la “ROKA” donde allí se extrae el material necesario para la realización de las pruebas de laboratorio.

- **Muestreo (ASTM D 75)**

El objetivo del muestreo consiste en obtener una porción representativa de volumen del material pétreo en estudio. Este se realiza directamente en el banco de material o en algún lugar de explotación.

- **Grava triturada, sello triturado, arena triturado y arena volcánica.**

Para el muestreo o extracción del material en este caso la grava triturada, sello triturado, arena triturado y arena volcánica, fue necesario ir al banco de materiales llamado “la Roka” ubicado en la vía Morelia - Salamanca a la altura de Cuto, de donde se extrajo una cantidad de volumen de material para su respectivo estudio.

Al finalizar la extracción de cada material se coloca en sacos o costales para ser llevados al laboratorio y así proceder a su respectiva utilización.

- **Secado del material**

La realización del secado del material consiste en localizar una zona en donde se tenga luz solar para exponer el material y realizar el secado natural. Se debe limpiar debidamente la zona donde se colocará el material y se procede a sacar cada material de sus sacos, se distribuye con ayuda de implementos de laboratorio como rastrillos o palas y se deja mínimo dos horas al sol.

Esto se debe realizar con cada material extraído del banco de materiales. Para garantizar un secado del material adecuado se debe realizar movimientos con implementos de laboratorio con el fin de mover las partículas de cada uno, estos movimientos se tienen

que hacer entre cada 15 min o 20 min para así lograr que cada grano o partícula se seque en cada una de sus áreas.

Al finalizar este proceso se guarda el material en sacos o costales y se procede a realizar las pruebas de laboratorio correspondientes.

6.3.1.2. Pruebas a los materiales pétreos

- **Cuarteo**

El cuarteo tiene como objetivo mezclar el material para obtener una mezcla homogénea, posteriormente se divide en tres partes lineales con el fin de mezclar de afuera hacia adentro el material, luego de que el material esté mezclado se busca hacer una especie de cono con el material, esto con el fin de volverlo una meseta y dividirlo en cuatro partes iguales. Por último, se toma material de extremos diferentes las veces que sea necesario para una sola prueba, en el caso de cambiar de prueba se vuelve a realizar cuarteo.

- **Peso volumétrico (ASTM C-29/C 29M-97)**

La prueba de peso volumétrico realizada a un material pétreo, se divide en dos partes, la primera es el peso volumétrico seco y la segunda el peso volumétrico varillado, las cuales se explicarán a continuación:

- **Peso volumétrico seco densidad seca mínima**

Consta de una tara de un volumen de 2800 cm^3 la cual se usa para el peso volumétrico, esta se llena en constantes capas con una elevación de 5 cm para el vaciado del material, cada vez que esta se va llenando se debe ir aumentando cada 5 cm la elevación. Luego de llenar por completo la tara se pesa en una balanza y se registra este peso para los cálculos correspondientes.

- **Peso volumétrico varillado densidad seca máxima**

Consta de una tara de 2800 cm^3 la cual es llenada en tres capas de igual espesor, por cada capa vertida en la tara mediante una varilla se realizan 25 golpes constantes al material, esto con el fin de reducir los vacíos que queden entre el mismo. Al terminar el llenado se enrasa la tara con la misma varilla, se procede a pesarlo en la balanza y se registra este peso como dato de laboratorio para realizar los cálculos pertinentes.

- **Granulometría (ASTM C 136-01)**

Esta prueba permite determinar la composición de los diferentes tamaños de las partículas de un material pétreo, las cuales son pasadas por un conjunto de mallas con aberturas determinadas según la norma empleada. Se toma cierta cantidad de cada material pétreo y se pasa por el juego de mallas correspondiente, el material que se vaya obteniendo en cada malla se pesa en una balanza y se registra el valor para realizar los cálculos correspondientes.

- **Densidad en agregado fino (ASTM C128-01)**

Se coloca un volumen de agua conocido en la probeta, en este caso 200 ml, después una cantidad de 300 gr de arena seca en la probeta con el agua. Se inclina el frasco y se gira una y otra vez de un lado hacia otro con la finalidad de que las burbujas suban a la superficie. Se determina el peso del frasco y se registra el volumen del frasco.

- **Densidad en agregado grueso (ASTM C127-01)**

Para realizar esta prueba se requiere el material que pasa la malla 1/2" y la que se retiene en la malla 3/8", buscando el valor de 1.5 Kilogramo con el objetivo de ponerlo a saturar durante 24 horas en agua, después de esto se seca superficialmente con ayuda de una franela, se pesa inmediatamente, seguidamente se extrae 300 g de este material; para poder usar el picnómetro tipo sifón se llena hasta lo indicado por la norma y se prosigue a insertar el material anteriormente ya saturado, con una probeta se ubica en la salida del sifón y se espera hasta que no se evidencie saliente de agua por el sifón del picnómetro. Se hace la lectura en la probeta de cuánta agua sale del picnómetro debido al material grueso. Este dato se registra como volumen desplazado para sus cálculos pertinentes.

- **Absorción en agregado fino (ASTM C 128-01)**

Previo a la realización de la prueba se satura una muestra de arena de 2 kg durante 24 horas. Se coloca el material en un recipiente a fuego medio, moviendo la arena de un lado a otro con ayuda de una espátula. Con el vidrio de reloj se verifica que no haya residuos de agua (vapor). Dentro del recipiente se coloca un molde metálico en forma de cono invertido, donde se llena con el material en tres capas, entre cada capa se debe realizar golpes con una barra metálica para así reducir al máximo los espacios entre partículas. Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir que ya está seca superficialmente, cuando se observe este factor se prosigue a pesar

en una balanza y se registra el peso como dato de laboratorio para los cálculos necesarios.

- **Absorción en agregado grueso (ASTM C127-01)**

Para la realización de la prueba se toma el material que pasa la malla 1/2" y la que se retiene en la malla 3/8", buscando el valor de 1.5 Kilogramo con el objetivo de ponerlo a saturar durante 24 horas en agua, pasado este tiempo se seca superficialmente con una franela y se pesa dos muestras de 300 gr, se pone a calentar cada muestra y con ayuda de un vidrio de reloj se sabrá cuando esta ya esté totalmente seca, ya que por medio de este elemento se puede verificar que no salga vapor de la muestra. Se deja enfriar la muestra y se registra su peso seco como dato de laboratorio para sus fines pertinentes.

- **Equivalente de arenas (ASTM D 2419-09)**

Para la realización de la prueba es necesario colocar una solución de trabajo en una probeta hasta llegar a la marca de 10 cm o 4". Luego se llena una cápsula de agregado fino, utilizando el embudo colocamos el material dentro de la probeta y se debe dejar reposar el material durante 10 minutos. Después se coloca un tapón tipo corcho y se agita horizontalmente durante 30 segundos, asegurando que sean 90 ciclos, enseguida se vuelve a colocar solución de trabajo en la probeta ahora hasta la marca de 15" limpiando el material pegado a las paredes, se deja reposar 20 min y se mide la distancia hasta dónde llega el material arcilloso, se introduce el irrigador lentamente, se deja asentar y se registra el nivel superior del material correspondiente a las arenas.

- **Desgaste de los ángeles (ASTM C 131-03)**

Se procede a realizar la granulometría correspondiente, ya que para esta prueba se necesita material grueso que pase la malla No.3 y se retenga en la No. 1/2" y pase la malla No.1/2 y se retenga en la No. 3/8; por medio del manual se determina el tamaño del agregado y la cantidad de esferas que se utilizaran para la prueba. En la máquina de desgaste de los ángeles se introduce el material junto con las esferas, se procede a iniciar el triturado del material mecánico durante 500 revoluciones, al terminar las revoluciones necesarias se saca el material y se tamiza por la malla No. 12, y se pesa en una balanza el material retenido en esta malla.

6.3.2. FASE 2

En el caso de las colillas de cigarrillo se buscó la manera de fomentar un acopio de este elemento en las diferentes facultades de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en la ciudad de Morelia – México, esto con el fin de tener la cantidad necesaria para el proceso del diseño de mezcla; la cal (cal apagada) utilizada fue proporcionada por los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y la indumentaria para la realización de las pastillas (muestras de la mezcla asfáltica).

Seguido de clasificar los materiales pétreos y de obtener la recolección de las colillas de cigarrillo se procede a realizar los cálculos según el método Marshall. Se determina el contenido óptimo y el contenido mínimo de asfalto para la realización de cada una de las pastillas.

6.3.2.1. Recolección de las colillas

Para la recolección de las colillas de cigarrillo se realizaron centros de acopio en diferentes facultades de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en la ciudad de Morelia – México, se reutilizaron tarros de cartón con complemento metálico y se adecuaron para esta actividad. De igual manera, se presentó la idea del proyecto a varios establecimientos nocturnos como bares, donde se les presentó los tarros para la recolección y así poder completar la cantidad necesaria para la realización de este proyecto.

6.3.2.2. Diseño de mezcla

Para la realización de las muestras (pastillas) de mezcla asfáltica y ser aprobadas por el método Marshall es necesario hacer el diseño, calculando inicialmente el contenido mínimo de asfalto y así partir de este valor para hacer la fabricación de los especímenes y concluir con el cálculo del contenido óptimo.

- **Propuesta**

Para determinar el porcentaje de cada material se debe tener los resultados de la prueba de granulometría. Ya con esto, se procede a determinar la tabla denominada “integración de los materiales pétreos”, donde se hace un resumen de todas las granulometrías y se realiza una propuesta en porcentaje de cada material, donde la sumatoria de los valores no de mayor al 100%, esto se logra con ayuda de la herramienta Excel.

Estos valores se deben insertar en una gráfica correspondiente junto con los límites de una granulometría densa con un valor de un millón de ejes equivalentes, con el fin que la propuesta no sobre pase ni sea menor a los límites correspondientes de la granulometría densa. Se gráfica límite inferior, límite superior y la propuesta vs abertura de la malla. Cuando la línea de la propuesta no sobrepase alguno de estos límites se acepta y se continúa a determinar el contenido mínimo de asfalto.

- **Contenido mínimo**

El contenido mínimo de asfalto depende de la granulometría, entre más agregados gruesos, es menor área de contacto, y entre más agregado fino hay más área de contacto. De igual manera, depende de la densidad, entre más densidad poca cantidad de poros y entre menos densidad hay mayor cantidad de poros.

Para la determinación del contenido mínimo de asfalto se deben tener en cuenta diferentes factores que dependen del material a utilizar. El primer factor es la constante de área para cada fracción de material, esta se determina con la tabla 3 “Áreas superficiales de la partícula para diferentes fracciones del material pétreo” que indica que constante se debe usar según el material que se encuentre entre las mallas puestas.

Tabla 3. Áreas superficiales de las partículas para diferentes fracciones del material pétreo.

Malla que Pasa	Malla que Retiene	(m ² /Kg)
1 1/2	3/4	0,27
3/4	No.4	0,41
No.4	No.40	2,05
No.40	No.200	15,38
No.200		53,3

Fuente: Vías de comunicación: caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos ⁶⁶

Otro factor es el índice de asfalto que se determina según el material utilizado y se clasifica con la tabla 4 “índice asfáltico” que su valor varía dependiendo las características del material grueso usado para el diseño.

⁶⁶ CRESPO Villalaz Carlos. Vías de comunicación: caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos. 3 ed. México: Limusa, 2004. ISBN 968-18-4849-7. P. 267.

Tabla 4. Índice asfáltico.

MATERIAL	INDICE ASFÁLTICO
Grava o Arenas del rio o material redondeados de baja absorción	0,0055
Gravas angulosas o redondeadas trituradas de baja absorción	0,006
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y roca triturada de media absorción	0,007
Rocas Trituradas de alta absorción	0,008

Fuente: Vías de comunicación: caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos ⁶⁷

Para hacer el cálculo correspondiente al contenido mínimo se debe recopilar los datos anteriormente determinados y los anteriormente descritos en las tablas.

- **Contenido mínimo - Método Analítico**

Para la determinación del contenido mínimo de asfalto mediante el método analítico se requiere la siguiente ecuación:

$$A = 0,02a + 0,045b + cd$$

Donde:

- A = contenido mínimo de asfalto.
- a = % de material retenido en malla No. 10.
- b = % que pasa No. 10 y retenido en No. 200.
- c = % que pasa No. 200.
- d = coeficiente de asfalto.

El coeficiente de asfalto se determina con la siguiente tabla 5:

⁶⁷ Ibid., p. 269.

Tabla 5. Coeficiente asfáltico.

Material	Coeficiente Asfáltico
Gravas o arenas de río o material redondeado baja absorción	0,15
Grava Triturada de baja absorción	0,2
Grava Triturada de media absorción	0,3
Grava Triturada de alta absorción	0,35

Fuente: Vías de comunicación: caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos ⁶⁸

Con la ecuación anterior y la tabla de coeficiente se debe recrear una nueva tabla, que dará para calcular el contenido mínimo de asfalto y las cantidades necesarias para una pastilla teniendo en cuenta un porcentaje de desperdicios de material, esto debe ser algo considerable.

6.3.3. FASE 3

Para determinar la cantidad de adición de colillas de cigarrillo se realizaron varias muestras de diferente proporción, cuya determinación es que las pastillas deben tener una cantidad de colillas de 3 g, y que la variable es la cantidad de cal hidratada y agua, por ende, se determinó 3.3 g, 5.0 g y 6.6 g para la cal hidratada y la cantidad de agua sería el doble de esta.

Con los valores mencionados se busca determinar si la cantidad de cal genera algún cambio significativo mezclándola con colillas de cigarrillo en una mezcla asfáltica densa en caliente.

Para la fabricación de las pastillas con adición de colillas de cigarrillo, principalmente teniendo los cálculos anteriormente ya descritos, se dividen cantidades necesarias por pastilla y por agregado; cada agregado se debe calentar a una temperatura entre 140°C y 160°C, al mismo tiempo se calienta el asfalto hasta alcanzar una temperatura de 140°C,

⁶⁸ Ibid., p. 270.

en un recipiente se agrega el material grueso debidamente caliente y al tiempo la cantidad de asfalto necesaria; en este caso se empleó una mezcladora automática; se mezcla el asfalto con el material grueso, cuando se visualice que todas las partículas del agregado están recubiertas de asfalto se procede a agregar el material fino y se mezcla nuevamente. En seguida, se saca el material y se vierte en moldes metálicos que deben estar previamente calentados y lubricados con aceite para evitar la adherencia entre el molde y la mezcla asfáltica, con ayuda de un compactador automático (martillo Marshall), se coloca el molde metálico con la cantidad de mezcla asfáltica y se procede a compactar con 75 golpes por cada cara de la pastilla; finalmente, se deja enfriar por 24 horas y se retira la pastilla del molde.

Se debe realizar mínimo tres medidas del diámetro y la altura de la pastilla con un pie de rey, se registra el peso con una balanza y se procede a sumergirla para poder obtener los valores correspondientes al peso sumergido, se lleva a saturación la pastilla durante 10 minutos en agua a temperatura ambiente, cumplido este tiempo, se seca superficialmente la pastilla con una franela. Posteriormente, se hace la prueba de peso sumergido que consta de una gramera, balde con agua a temperatura ambiente y una canastilla para sostener la pastilla anteriormente saturada y pesada, se coloca en la canasta, y con ayuda de la gramera se registra el peso; se retira la pastilla y se procede a insertar las pastillas en un baño maría a temperatura de 30 °C durante 30 minutos. Al cumplir este tiempo se extrae la pastilla y se ensaya en la prensa Marshall, donde de allí se obtienen los valores de estabilidad y flujo.

Para la adición de colillas de cigarrillo, se les realizó una breve limpieza que consiste en quitar el papel envolvente y abrirlas de manera longitudinal para retirar el residuo de nicotina en su interior, se dejan en una franela a la luz del sol; se pesó 3 gr de colillas de cigarrillo para cada pastilla y se le adiciono intervalos de cal hidratada con agua; a continuación, se determinó las cantidades con la siguiente tabla 6.

Tabla 6. Cantidades de relación cal-agua.

ADICION DE COLILLAS DE CIGARRILLO				
PASTILLAS	COLILLAS (gr)	CAL (gr)	AGUA (ml)	Cantidad
TESTIGO	0	0	0	15
MODIFICADO N°1	3	3,33	6,66	15
MODIFICADO N°2	3	5,00	10,00	15
MODIFICADO N°3	3	6,66	13,32	15

Fuente: Propia

Para agregar las colillas de cigarrillo a la mezcla y las cantidades correspondientes por pastilla, cuando la mezcla asfáltica esté con los agregados finos y gruesos en la mezcladora automática se agrega las colillas saturadas con cal y agua.

En total se realizaron 15 pastillas testigo y 45 pastillas modificadas, con el objetivo de encontrar el contenido de asfalto óptimo y comparar entre la testigo y las modificadas; además, observar cambios significativos respecto a la estabilidad, fluencia, vacíos, entre otras características.

6.3.4. FASE 4

Para el análisis de los resultados se realizaron en total sesenta pastillas, las cuales quince de estas fueron pastillas testigo con un diseño de mezcla asfáltica densa en caliente con características convencionales, esto con el propósito de hacer una comparación de datos con las pastillas que tienen colillas de cigarrillo y diferentes porcentajes de cal hidratada y agua, así se procede a identificar los valores que se encuentren en los rangos según normativa americana, adicionando a esto, hacer una distinción del comportamiento que tienen cada una referente al método Marshall.

6.3.4.1. Contenido óptimo

El contenido óptimo para cada uno de los diferentes porcentajes de asfalto y colillas de cigarrillo se denomina mediante las diferentes gráficas que se trazan con los valores obtenidos de la prueba Marshall, en total son seis gráficas para cada quince pastillas en donde se evidencia el comportamiento, en las cuales están las testigos con un diseño convencional, y las modificadas. Mediante la distribución de puntos que muestra cada una de las gráficas de los diferentes porcentajes de asfalto, se denomina el contenido óptimo de las diferentes cantidades de asfalto siendo este el valor más importante para las pastillas testigo; para las pastillas modificadas se realiza el mismo análisis anteriormente mencionado, con la diferencia que adicional se verifica la cantidad propia de cal, colillas de cigarrillo y agua óptimos para el diseño de mezcla.

El análisis de cada una de las gráficas para verificar si cumple con los parámetros estipulados según la Normativa se realiza mediante la detallada comparación de la distribución de puntos que contiene cada una de las gráficas, además de los valores de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos los cuales deben cumplir con el rango de parámetros estipulados en la norma.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se da a conocer cada uno de los resultados con su respectivo análisis de las diferentes pruebas que se realizaron a los materiales pétreos y del método Marshall a lo largo del diseño de un pavimento denso en caliente con la adición de colillas de cigarrillo; además de presentar evidencias de la investigación mediante tablas y fotos del proceso realizado. Se presentarán los resultados en orden de las fases anteriormente planteadas en la metodología.

7.1. PRUEBAS A LOS MATERIALES PÉTREOS

7.1.1. Extracción de materiales

La extracción de los materiales pétreos se realizó en un Banco de materiales ubicado en la vía Morelia - Salamanca a la altura de Cuto. Como se puede observar en la foto 1 y 2; la extracción de material fue realizada directamente en el banco de materiales la “ROKA” siendo esta de manera satisfactoria debido a que se pudo extraer los materiales pétreos como la grava, sello y arena triturada y la cantidad adecuada que se requerían para el diseño de mezcla asfáltica densa en caliente.

Foto 1. Banco de materiales “la Roka”.



Fuente: Propia

Foto 2. Recolección de cada uno de los materiales pétreos necesarios para el diseño de mezcla.



Fuente: Propia

Para mayor ilustración sobre los resultados de esta prueba, ver Anexo C, en el apartado C.1.1. fotos 1, 2, 3 y 4.

7.1.2. Secado de material

Para el secado de material se puede evidenciar en la foto 3 que corresponden al proceso de secado de cada uno de los materiales pétreos respectivamente. Para mayor ilustración del secado de material, ver Anexo C, Apartado C.1.2. fotos 5, 6, 7 y 8.

Foto 3. Secado natural de materiales pétreos.



Fuente: Propia

Para el secado del material: grava triturada, sello triturado y arena triturada, se estipuló un proceso de secado natural el cual fue 2 horas comprendidas entre las 12:00 pm y 2:00 pm, con intervalos de movimiento del material, cada 20 minutos obteniendo así el secado de manera adecuada. Para ver los datos tomados en campo ver Anexo B, apartado B.1.1.

7.1.3. Peso volumétrico

7.1.3.1. Peso volumétrico seco y suelto

En la prueba de masa volumétrica seco y suelto se realizó el mismo proceso para cada uno de los diferentes materiales pétreos que se utilizaron para el diseño de mezcla asfáltica, correspondiente a grava triturada, sello triturado y arena, tanto triturada como volcánica. Para ver un proceso más detallado de esta prueba, diríjase al Anexo C, apartado C.1.3.1. foto 9, 10, 11, 12 y 13.

Foto 4. Prueba de peso volumétrico seco y suelto.



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 7 se presenta los resultados de la prueba del peso volumétrico seco suelto para cada material pétreo, donde se expresan los datos obtenidos del ensayo de masa volumétrica seco y suelto, en el que esta se realizó para cada uno de los materiales pétreos, así obteniendo la masa neta del material por unidad de volumen. Para este caso respecto a las dimensiones de la tara utilizada, con referencia a los valores, el mayor es el de arena triturada siendo este 1.6035 g/cm^3 , la cual expresa que fue mayor la masa ocupada por unidad de volumen, presentando una acomodación de las partículas debido a la forma de esta, y el valor menor fue el de la arena volcánica de 1.4116 g/cm^3 evidenciando la masa por unidad de volumen del material, dando a conocer el espaciamiento que existió entre cada una de las partículas del material. Para ver los datos obtenidos en el laboratorio ver Anexo B, apartado B.1.2.

Tabla 7. Tabla resumen del peso volumétrico seco y suelto.

Peso volumétrico (sin golpes)	
MATERIAL	Densidad min (g/cm ³)
Grava Triturada	1,4324
Sello Triturado	1,4915
Arena Triturada	1,6035
Arena Volcánica	1,4116

Fuente: Propia

7.1.3.2. Peso volumétrico seco y varillado

La prueba de masa volumétrica seco y varillado, se realizó para cada uno de los diferentes materiales pétreos que se utilizaron para el diseño de mezcla asfáltica, como lo es grava triturada, sello triturado y arena tanto triturada como volcánica. Para observar mayor a detalle esta prueba, ver Anexo C, apartado C.1.3.2, de foto 14,15,16,17,18,19 y 20.

Foto 5. Realización de los 25 golpes correspondientes según prueba peso volumétrico seco varillado.



Fuente: Propia

Foto 6. Enrase de material según geometría de la tara.



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 8 se presenta los resultados de la prueba del peso volumétrico seco varillado para cada material pétreo. Los valores mostrados presentan la cantidad de masa por unidad de volumen para la prueba de masa volumétrica seco varillado, en donde se presenta el valor mayor siendo este 1.7455 g/cm^3 para la arena triturada, mostrando que para este ensayo existe mayor masa por unidad de volumen debido al varillado que existió por cada capa de material, evidenciando la reacomodación de las partículas del material; por otro lado, el menor valor fue 1.5098 g/cm^3 para la arena volcánica, representando que a pesar del varillado siempre existe un difícil reacomodo de las partículas debido a su forma volcánica. Para ver los datos obtenidos en el laboratorio ver Anexo B, apartado B.1.2.

Tabla 8. Tabla resumen del peso volumétrico suelto varillado.

Peso volumétrico (Con golpes)	
MATERIAL	Densidad máx. (g/cm^3)
Grava Triturada	1,5181
Sello Triturado	1,5513
Arena Triturada	1,7455
Arena Volcánica	1,5098

Fuente: Propia

7.1.4. Granulometría

La prueba de granulometría se realizó mediante la obtención del peso del material pétreo por unidad de volumen. El procedimiento para esta prueba es el mismo para cada material pétreo, lo único que varía son las aberturas de las mallas. Para ver a detalle esta granulometría en todos los materiales pétreos, ver Anexo C, apartado C.1.4, foto 21 a la 32.

En la foto 7 y 8 se puede observar la granulometría para el material grava triturada.

Foto 7. Prueba de granulometría para la grava triturada.



Fuente: Propia

Foto 8. Prueba de granulometría para la grava triturada.



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 9 se presenta los resultados de la prueba de granulometría del material grava triturada. Para el análisis de la granulometría en gravas se tuvo un valor inicial de 16395 g el cual es el peso por unidad de volumen utilizado. En la tabla se puede evidenciar el material retenido en cada una de las mallas que corresponden al análisis granulométrico en gravas, en donde el valor retenido mayor se presenta en la malla $\frac{3}{4}$ " siendo este de 1020.00 g y el menos valor en la malla No. 4 de 20.00 g, lo cual nos quiere decir que el material pétreo seleccionado contiene un tamaño de partículas cuya retención se presenta mayor en la malla $\frac{3}{4}$ " en general.

Tabla 9. Tabla resumen de la granulometría para la grava triturada.

Granulometría de Grava	
Malla	Material Retenido (g)
2"	0,00
1 1/2"	0,00
1 1/4"	0,00
1"	0,00
3/4"	1020,00
1/2"	8650,00
3/8"	6110,00
1/4"	540,00
No.4	20,00
Pasa No.4	30,00
SUMAS	16370,00

Peso Inicial (g)	16395
-------------------------	--------------

Fuente: Propia

En la foto 9 se presenta la prueba de granulometría para el material sello triturado.

Foto 9. Prueba de granulometría para el sello triturado.



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 10 se puede observar los resultados de la prueba de granulometría para el material sello triturado. La granulometría del sello tuvo un valor inicial de 3848 g respectivamente para la realización de la prueba. En la tabla se evidencia cada uno de los valores retenidos por malla según el juego de mallas que corresponde a la granulometría del sello, en el cual se presenta mayor cantidad de material retenido en la malla $\frac{1}{4}$ " y el menor valor retenido en la malla No.4, correspondiendo estos valores a que la distribución de tamaños de agregado para el sello se retiene en mayor cantidad en la malla $\frac{1}{4}$ ", siendo así el tamaño de la partícula que más abunda en el material.

Tabla 10. Tabla resumen de la granulometría para el sello triturado.

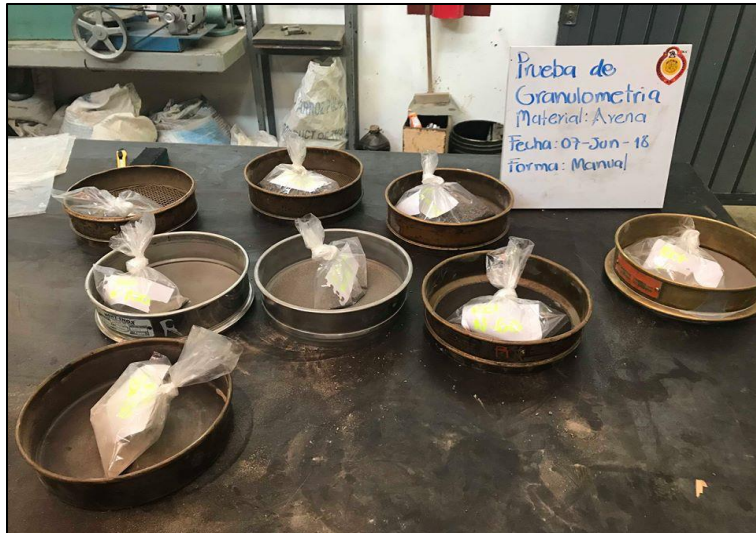
Granulometría de Sello	
Malla	Material Retenido (kg)
1/2	0
3/8	0,936
1/4	2,346
N.4	0,378
Pasa No.4	0,14
Suma	3,800

Peso Inicial (g)	3848
-------------------------	------

Fuente: Propia

En la foto 10 se puede evidenciar la prueba de granulometría para el material arena triturada.

Foto 10. Prueba de granulometría para la arena triturada



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 11 se presenta los resultados de la prueba de granulometría del material arena triturada. La granulometría de la arena triturada tuvo un valor inicial de 0.661 kg respectivamente para la realización de la prueba, en la tabla se evidencia cada uno de los valores retenidos por malla según el juego de mallas que corresponde a la granulometría de la arena, en el cual presenta mayor cantidad de material retenido en la malla No. 10 siendo este de 0.326 kg y el menor valor retenido en la malla No.4 con 0.01 kg, correspondiendo estos valores a que la distribución de tamaños de agregado para la arena se retiene en mayor cantidad en la malla No. 10, siendo así el tamaño de la partícula que es más repetitivo en el material pétreo.

Tabla 11. Tabla resumen de la granulometría para arena triturada.

Granulometría de Arena Triturada	
Malla	Material Retenido (Kg)
N.4	0,01
N.10	0,326
N.20	0,177
N.40	0,051
N.60	0,018
N.100	0,016
N.200	0,017
Fondo	0,047
Suma	0,662

Peso Inicial (Kg)	0,661
-------------------	-------

Fuente: Propia

En la foto 11 se puede observar la prueba de granulometría para el material de arena volcánica.

Foto 11. Prueba de granulometría para la arena volcánica.



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 12 se presenta los resultados de la prueba de granulometría del material arena triturada. Para el análisis de la granulometría en arena volcánica se tuvo un valor inicial de 4018 g, el cual es el peso por unidad de volumen utilizado. En la tabla se puede evidenciar el material retenido en cada una de las mallas que

corresponden al análisis granulométrico en arena volcánica, en donde el valor retenido mayor se presenta en la malla No. 20 siendo este de 1.436 kg y el menor valor en la malla No. 4 de 0.018 kg, lo cual quiere decir que el material pétreo seleccionado contiene un tamaño de partículas cuya retención se presenta mayor en la malla No. 20 en general.

Tabla 12. Tabla resumen de la granulometría para arena volcánica.

Granulometría de Arena Volcánica	
Malla	Material Retenido (Kg)
N.4	0,018
N.10	0,317
N.20	1,436
N.40	1,294
N.60	0,336
N.100	0,21
N.200	0,108
Fondo	0,207
Suma	3,926

Peso Inicial (g)	4018
-------------------------	------

Fuente: Propia

Para ver los datos obtenidos en el laboratorio de la prueba de granulometría para cada material pétreo ver Anexo B, apartado B.1.3.

7.1.5. Densidad

La densidad de los materiales pétreos tiene como finalidad conocer el valor de la masa sólida por unidad de volumen de cada material, esto teniendo en cuenta que no contienen vacíos una vez realizada la prueba. Para mayor ilustración de esta prueba a los materiales pétreos, ver Anexo C, apartado C.1.5, foto 33 a la 37.

7.1.5.1. Densidad para material grueso

Para la prueba de densidad en los materiales gruesos se encuentra la grava triturada y el sello triturado, siendo así, el mismo procedimiento para los dos materiales.

En la foto 12 y 13 se puede observar la prueba de densidad a los materiales gruesos.

Foto 12. Prueba de densidad material grueso.



Fuente: Propia

Foto 13. Prueba de densidad material grueso.



Fuente: Propia

Para el análisis de la densidad de los materiales gruesos es necesario tener en cuenta los requisitos de calidad de los materiales pétreos, que varían según el número de ejes equivalentes, que para este caso, es un millón de ejes equivalentes. A continuación, se muestra los requisitos de calidad.

Tabla 13. Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa cuando $\sum L \leq 10$.

Característica ^[1]		Valor
GRAVA		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4
Desgaste de Los Ángeles, %, máximo		35
Desgaste Microdeval, %, máximo		18
Intemperismo acelerado, %, (5 ciclos), máximo ^[2]	En sulfato de sodio	15
	En sulfato de magnesio	20
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo		40
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	90
	Dos o más caras	80
Desprendimiento por fricción, %, máximo		20
ARENA Y FINOS		
Densidad relativa del material pétreo seco (d_{ps}), mínimo		2,4
Angularidad, %, mínimo		40
Equivalente de arena; %, mínimo		45
Azul de metileno, mg/g, máximo		18

[1] El material será 100% producto de trituración de roca sana.
 [2] Será suficiente que el intemperismo acelerado cumpla con una de las dos condiciones: en sulfato de sodio o en sulfato de magnesio.

Fuente: N-CMT-4-04/17⁶⁹

A continuación, en la tabla 14 se presenta los resultados de la prueba de densidad para los materiales gruesos, es necesario que cumpla los requisitos de calidad la grava como material pétreo; por lo tanto, la prueba da un resultado de 2.414 g/cm³ y según los requisitos de calidad debe ser de 2.4 g/cm³, esto quiere decir que la grava cumple con el requisito mínimo de densidad. Para ver los datos obtenidos en el laboratorio ver, Anexo B, apartado B.1.4.

Tabla 14. Tabla resumen de la prueba de densidad de los materiales gruesos.

Prueba de densidad materiales gruesos	
Material	Densidad (g/ cm ³)
Grava triturada	2,414
Sello triturado	2,7273

Fuente: Propia

⁶⁹ Secretaría de Comunicación y Transporte. Características de los materiales. N-CMT-4-04/17. Estados Unidos Mexicanos, 2017. p.6.

7.1.5.2. Densidad para material fino

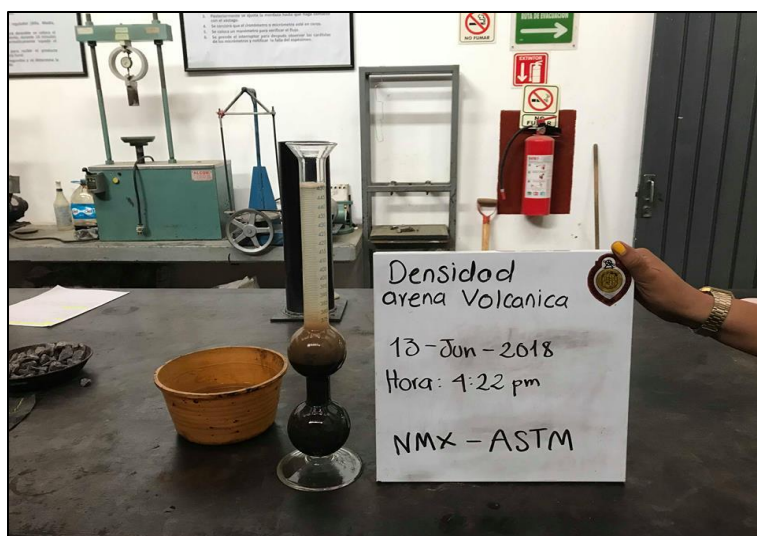
Para la prueba de densidad en los materiales finos se encuentra la arena triturada y la arena volcánica, siendo así, el mismo procedimiento para los dos materiales. En la foto 14 y 15 se puede observar la prueba de densidad a los materiales finos.

Foto 14. Prueba de densidad al material fino.



Fuente: Propia

Foto 15. Prueba de densidad al material fino.



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 15 se presenta los resultados de la prueba de densidad para los materiales finos. Los materiales finos como la arena volcánica y la arena triturada

deben cumplir los requisitos de calidad de acuerdo a la tabla 13 como materiales pétreos; por lo tanto, la prueba da un resultado aproximado de 2.6 g/ml para arena triturada y para la arena volcánica un resultado aproximado 2.4 g/ml, y según los requisitos de calidad debe ser de 2.4 g/ml, esto quiere decir que el material fino cumple con el requisito mínimo de densidad.

Tabla 15. Tabla resumen de la prueba de densidad de los materiales finos

Prueba de densidad materiales finos	
Material	Densidad (g/ml)
Arena triturada	2,5821
Arena Volcánica	2,3874

Fuente: Propia

7.1.6. Absorción

La prueba de absorción determina la cantidad de líquido por material que retuvieron con el fin de tener un análisis de los porcentajes calculados. Para visualizar la serie completa correspondiente a esta prueba, ver Anexo C, apartado C.1.6, fotos 38 a la 43.

7.1.6.1. Absorción para material grueso

Para la prueba de absorción en los materiales gruesos se encuentra la grava triturada y el sello triturado, siendo así, el mismo procedimiento para los dos materiales. En la foto 16 y 17 se puede observar la prueba de densidad a los materiales gruesos.

Foto 16. Prueba de absorción al material grueso.



Fuente: Propia

Foto 17. Prueba de absorción al material grueso.



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 16 se presenta los resultados de la prueba de absorción para los materiales gruesos. La absorción con referencia a los materiales pétreos como lo son la grava triturada y el sello triturado dieron resultados como se presentan en la tabla, siendo estos calculados directamente en laboratorio y los obtenidos en las pruebas a los materiales.

Tabla 16. Resumen de datos de la prueba de absorción de los materiales gruesos.

Prueba de absorción materiales gruesos	
Material	Absorción %
Grava triturada	0,5280
Sello triturado	2,0408

Fuente: Propia

7.1.6.2. Absorción para material fino

Para la prueba de absorción en los materiales finos se encuentra la arena triturada y la arena volcánica, siendo así, el mismo procedimiento para los dos materiales. En la foto 18 y 19 se puede observar la prueba de absorción a los materiales finos.

Foto 18. Prueba de absorción al material fino



Fuente: Propia

Foto 19. Prueba de absorción al material fino.



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 17 se presenta los resultados de la prueba de absorción para los materiales finos. La absorción con referencia a los materiales pétreos como lo son la arena triturada y arena volcánica dieron resultados como se presentan en la tabla, siendo estos calculados directamente en laboratorio y los obtenidos en las pruebas a los materiales. Para apreciar los datos obtenidos en el laboratorio ver Anexo B, apartado B.1.5.

Tabla 17. Tabla resumen de la prueba de absorción de los materiales finos.

Prueba de densidad materiales finos	
Material	Absorción %
Arena triturada	5,3265
Arena Volcánica	3,5656

Fuente: Propia

7.1.7. Equivalente de Arena

Para la prueba equivalente de arena se considera determinar la cantidad de arena arcillosa o arcilla que contiene una cantidad específica de material, para este caso arena triturada y arena volcánica, siendo así, el mismo procedimiento para los dos materiales.

En la foto 20 se puede observar la prueba de equivalente de arena. Para mayor ilustración de este proceso, ver Anexo C, apartado C.1.7, fotos 44, 45 y 46.

Foto 20. Prueba de equivalente de arena.



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 18 se presenta los resultados de la prueba de equivalente de arena; los materiales finos correspondiente a arena triturada y arena volcánica debe cumplir los requisitos de calidad de la tabla 13, por lo tanto, la prueba nos da un resultado aproximado de 81.5 % para arena triturada y para la arena volcánica un resultado aproximado 87.6 %, y según los requisitos de calidad el equivalente de arena debe ser mínimo de 45% esto quiere decir, que los materiales finos cumplen con el requisito mínimo de calidad. Para percibir los datos obtenidos en el laboratorio ver Anexo B, apartado B.1.6.

Tabla 18. Tabla resumen de la prueba de equivalente de arena.

Equivalente de Arena	
Material	Eqv. De arena (%)
Arena Triturada	81,49
Arena Volcánica	87,63

Fuente: Propia

7.1.8. Desgaste de los Ángeles

La prueba de desgaste de los ángeles consiste en dar a conocer el desprendimiento de material sometido a grandes impactos en un tambor de acero con unas esferas que predetermina la norma. Para la prueba de desgaste de los ángeles se encuentra la grava triturada y el sello triturado, siendo así, el mismo procedimiento para los dos materiales.

En la foto 21 y 22 se puede observar la prueba de desgaste de los ángeles. Para mayor ilustración, ver Anexo C, apartado C.1.8, fotos 47, 48, 49 y 50.

Foto 21. Prueba de desgaste de los ángeles.



Fuente: Propia

Foto 22. Prueba de desgaste de los ángeles.



Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 19 se presenta los resultados de la prueba de desgaste de los ángeles. El material pétreo de grava triturada debe cumplir con los requisitos de calidad de la tabla 13, por lo tanto, la prueba nos da un resultado aproximado de 12 % y según los requisitos de calidad debe ser máximo de 35 %, esto quiere decir que el

desprendimiento de material a una carga abrasiva cumple dentro del rango estipulado. Para ver los datos obtenidos en el laboratorio dirigirse Anexo B, apartado B.1.7.

Tabla 19. Tabla resumen de la prueba de desgaste de los ángeles.

Desgaste de los ángeles			
Material	Tipo	Esferas	Pu (%)
Grava triturada	B	11	11,92
Sello triturado	C	8	12,84

Fuente: Propia

7.2. RECOLECCIÓN DE LAS COLILLAS DE CIGARRILLO

Para la recolección de las colillas de cigarrillo se realizaron centros de acopio en diferentes facultades de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en la ciudad de Morelia – México. Como se puede observar en la foto 23 y 24 se reutilizaron tarros de cartón con complemento metálico y se adecuaron para esta actividad.

Foto 23. Recolección de colillas de cigarrillo.



Fuente: Propia

Foto 24. Recolección de colillas de cigarrillo.



Fuente: Propia

7.3. PROPUESTA GRANULOMÉTRICA

Para la realización de la mezcla asfáltica densa en caliente por el método Marshall inicialmente se debe realizar una propuesta granulométrica que consiste en unos valores de forma porcentual que indican la cantidad de material que se debe utilizar para la mezcla, los porcentajes propuestos se pueden apreciar en la tabla 20.

Tabla 20. Tabla resumen de los porcentajes para la propuesta granulométrica.

Material	% Propuesto
Grava Triturada	25,00
Sello Triturada	30,00
Arena Volcánica	25,00
Arena Triturada	20,00
SUMAS	100,00

Fuente: Propia

Para determinar la propuesta de cada porcentaje para cada material se debe tener en cuenta las granulometrías.

Tabla 21. Granulometría grava triturada.

Malla	Material Retenido (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que Pasa
2"	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/4"	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	1020,00	6,23	6,23	93,77
1/2"	8650,00	52,84	59,07	40,93
3/8"	6110,00	37,32	96,40	3,60
1/4"	540,00	3,30	99,69	0,31
No.4	20,00	0,12	99,82	0,18
Pasa No.4	30,00	0,18	100,00	0,00
SUMAS	16370,00	100,00		

Fuente: Propia

Para la siguiente tabla, se procede a graficar los límites correspondientes a la designación de 1" el cual corresponde al tamaño máximo que hace referencia al paso del 100 % del material; por consiguiente, se ingresa con este valor y en donde pase 100% es el tamaño nominal del material pétreo que viene siendo ¾ de pulgada estaría los límites a graficar.

Tabla 22. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.

Malla		Tamaño nominal del material pétreo ^[1]				
Abertura mm	Designación	mm (in)				
		9,5 (%)	12,5 (½)	19 (¾)	25 (1)	37,5 (1½)
Porcentaje que pasa (en masa)						
50	2 in	---	---	---	---	100
37,5	1½ in	---	---	---	100	90 - 100
25	1 in	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	¾ in	---	100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	½ in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	¾ in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	¾ in	70 - 89	56 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	N°4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	N°10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	N°20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	N°40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	N°60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	N°100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	N°200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

[1] El tamaño nominal de un material pétreo es la abertura de la malla con la que se designa el material que cumpla con una determinada granulometría.

Fuente: N-CMT-4-04/17⁷⁰

⁷⁰ Secretaria de Comunicación y Transporte. Características de los materiales. N-CMT-4-04/17. Estados Unidos Mexicanos, 2017. 3 p

Posteriormente, se grafica el límite inferior, límite superior y la propuesta vs abertura de la malla, para así verificar que la propuesta no se extienda fuera de los límites estipulados en la gráfica; a continuación, en la Tabla 23 y gráfica 1 se presenta los valores correspondientes a la propuesta. Para visualizar la propuesta granulométrica completa ver Anexo B, apartado B.1.8.

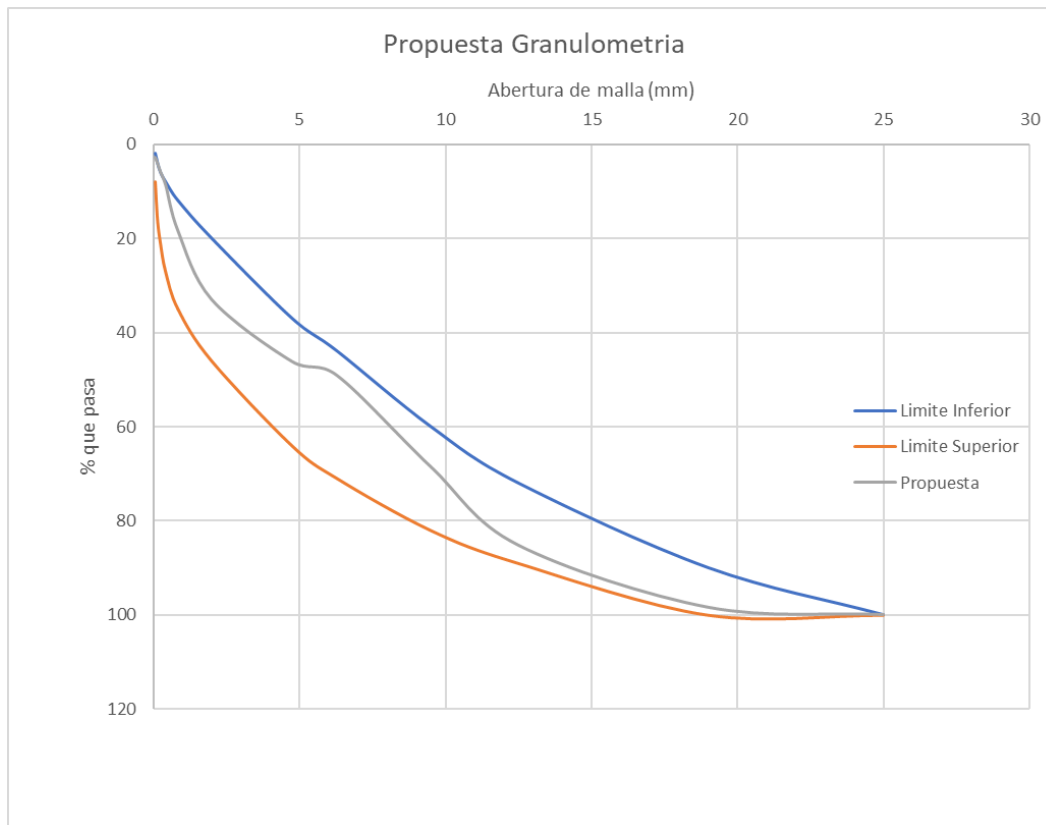
Tabla 23. Datos de la gráfica para la propuesta.

Granulometría Densa, 1 M de ejes Equivalentes			Propuesta
Límite Inferior	Límite superior	Abertura de la Malla (mm)	
100	100	25	100,00
90	100	19	98,44
72	89	12,5	85,23
60	82	9,5	68,52
44	71	6,3	49,16
37	64	4,75	46,15
20	46	2	32,97
12	35	0,85	18,36
8	27	0,425	8,51
6	21	0,25	5,81
4	16	0,15	3,98
2	8	0,075	2,77

Fuente: Propia

Como se puede observar en la siguiente gráfica la línea naranja es el límite superior, la azul representa el límite inferior y la línea gris es la propuesta, por lo tanto, se puede evidenciar que la línea gris se encuentra dentro de los límites y no sobre pasa ninguno de estos, de lo que se puede decir que la propuesta estipulada cumple y se acepta con los requerimientos y se puede continuar a realizar el cálculo mínimo de asfalto.

Gráfica 1. Propuesta granulométrica.



Fuente: Propia

NOTA: Para realizar las pruebas de laboratorio referente a la caracterización de los materiales pétreos se tuvo como fuente principal las normas ASTM (American Society for Testing and Materials). Para la propuesta granulométrica se utilizaron los límites granulométricos expuestos en las normas mexicanas de la SCT (Secretaría de Comunicación y Transporte), dichos límites se compararon con las normas colombianas del INVIAS (Instituto Nacional de Vías) y se evidenció que se usaron más tamices en la norma mexicana; por lo tanto, la curva granulométrica no se ajusta con los límites de la norma del INVIAS, dichos límites corresponden al capítulo 4 - pavimentos asfálticos, artículo 450, tabla 450-6 franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. En la evaluación y realización de los análisis de resultados por el método Marshall y de los criterios de diseño se tuvo en cuenta las normas colombianas INVIAS y las normas SCT, puesto que la metodología principal del método Marshall fue guiada desde México, pero se quiso comprobar que el diseño de mezcla asfáltica cumpliera con las normas de colombianas.

7.4. CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO

El contenido mínimo de asfalto depende de la granulometría de los materiales anteriormente analizados. Para la determinación del contenido mínimo de asfalto se deben tener en cuenta diferentes factores que dependen del material a utilizar, el primer factor es la constante de área para cada fracción de material, esta se determina con la tabla 3. Otro factor, es el índice de asfalto que se determina según el material utilizado y se clasifica de acuerdo a la tabla 4.

Para hacer el cálculo correspondiente al contenido mínimo se debe recopilar los siguientes datos, estos son de la propuesta anteriormente determinada.

Tabla 24. Datos de propuesta.

Mallas	% que paso	
1 1/2	100	
1	100,00	100-98,44
3/4	98,44	
1/2	85,23	
3/8	68,52	98,44-46,15
1/4	49,16	
No.4	46,15	
No.10	32,97	
No.20	18,36	46,15-8,51
No.40	8,51	
No.60	5,81	
No.100	3,98	8,51-2,77
No.200	2,77	

Fuente: Propia

Para finalizar, teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se procede a realizar la siguiente tabla 25, se evidencia los cálculos correspondientes para determinar el contenido mínimo de asfalto; en donde, para el cálculo del porcentaje del peso se tuvo en cuenta la tabla 23 con las respectivas mallas y el porcentaje que pasa en cada una de ellas, el valor se calcula mediante una resta de valores. Para la constante de área, esta se determina dependiendo del material en cada intervalo de mallas. Para el cálculo de la superficie parcial se debe realizar una multiplicación del porcentaje de peso por la constante de área y de esta manera se obtiene estos valores, el índice asfáltico se clasifica dependiendo de la absorción del material, la angularidad y procedencia, y para el contenido mínimo de asfalto se multiplica la superficie parcial por el índice asfáltico. La sumatoria de los valores del contenido mínimo de asfalto representan el valor a

efectuar del verdadero contenido mínimo de asfalto, siendo este de 2.5579%, para tener un valor exacto se presenta un contenido mínimo de 2.5 %.

Tabla 25. Cálculo para determinar el contenido mínimo de asfalto.

Malla que Pasa	Malla que Retiene	% Peso	Constante de Área (m ² /Kg)	Superficie Parcial	Índice asfáltico	Contenido Mínimo (%)
1 1/2	3/4	1,56	0,27	0,421	0,006	0,0025
3/4	No.4	52,29	0,41	21,440	0,006	0,1286
No.4	No.40	37,64	2,05	77,154	0,007	0,5401
No.40	No.200	5,75	15,38	88,406	0,008	0,7073
No.200		2,77	53,3	147,424	0,008	1,1794
Sumas		100,00				2,5579

Contenido Mínimo de Asfalto (%)	2,5579
--	---------------

Fuente: Propia

7.5. CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO MEDIANTE EL MÉTODO ANALÍTICO

Para finalizar de determinar el contenido mínimo de asfalto se debe realizar mediante un método analítico y así poder comparar con el contenido mínimo de asfalto anteriormente calculado; para ello se requiere la ecuación descrita en el apartado 6.2.5 del capítulo 6 correspondiente a la metodología y la tabla 5 correspondiente al coeficiente asfáltico, que en este caso es un valor de 0.2 y 0.3, dando referencia a un material de grava triturada de baja y media absorción, como se determina dos valores del coeficiente asfáltico debe salir dos valores de contenido mínimo de asfalto y el mayor entre estos será la cantidad seleccionada. Con los valores anteriormente descritos se determina el contenido mínimo de asfalto.

Para la determinación del contenido mínimo de asfalto por el método analítico se procedió al uso de los cálculos expuestos, teniendo como resultado dos contenidos mínimos de asfalto: el primero con un valor de 3.25% y el segundo con un valor de 3.53%; adicionalmente el anterior contenido mínimo de asfalto calculado que fue de 2.5%; se presentan estos tres valores, tomando como guía el valor mayor como contenido mínimo de asfalto, siendo este de 3.53%, por lo tanto se determina el contenido mínimo de asfalto de **3.5 %**.

Tabla 26. Cálculo para determinar el contenido mínimo de asfalto mediante el método analítico.

- A** = Contenido mínimo de asfalto
- a** = % de material retenido en malla No. 10
- b** = % que pasa No.10 y retenido en No.200
- c** = % que pasa No. 200
- d**= Coeficiente de asfalto

A	67,03
B	30,21
C	2,77
d1	0,2
d2	0,3

A1	3,25
A2	3,53

Fuente: Propia

Seguidamente se realiza el cálculo del contenido mínimo de asfalto, se prosigue a determinar la cantidad de material requerido por malla para realizar una pastilla y el material requerido para hacer 60 pastillas, de igual manera se debe considerar a partir de la malla No.10 la cantidad total que deberá ser tanto para arena volcánica como para arena triturada. A continuación, se mostrará la tabla 27 con todos los valores anteriormente mencionados; de igual manera, se puede analizar que la cantidad total requerida para la realización de una pastilla fue de 1135 g, enseguida se calculó la cantidad de material retenido por cada malla y el material requerido para una pastilla y posterior para 60 pastillas. Estos datos son necesarios al momento de la fabricación de cada una de las pastillas.

Tabla 27. Cálculo para determinar la cantidad necesaria de material para 60 pastillas.

Malla	% que pasa	% Retenido	Material 1 pastilla (g)	Cantidad Retenida por malla (g)	60 pastillas	Cantidad Retenida por malla (g) Arena Volcánica	Cantidad Retenida por malla (g) Arena Triturada	Cantidad Arena Volcánica	Cantidad Arena Triturada	
1	100,00	0,00	1135	0,00	0,00					
3/4	98,44	1,56		17,68	1060,81					
1/2	85,23	13,21		149,94	8996,11					
3/8	68,52	16,71		189,71	11382,74					
1/4	49,16	19,35		219,68	13180,61					
No.4	46,15	3,01		34,19	2051,44					
No.10	32,97	13,18		149,57	8974,28	4935,86	4038,43	82,26	67,31	
No.20	18,36	14,62		165,89	9953,31	5474,32	4478,99	91,24	74,65	
No.40	8,51	9,84		111,71	6702,61	3686,44	3016,18	61,44	50,27	
No.60	5,81	2,70		30,66	1839,78	1011,88	827,90	16,86	13,80	
No.100	3,98	1,83		20,82	1249,09	687,00	562,09	11,45	9,37	
No.200	2,77	1,21		13,76	825,62	454,09	371,53	7,57	6,19	
Fondo	0	2,77		31,39	1883,59	1035,98	847,62	17,27	14,13	
SUMAS		100,00			1135,00					

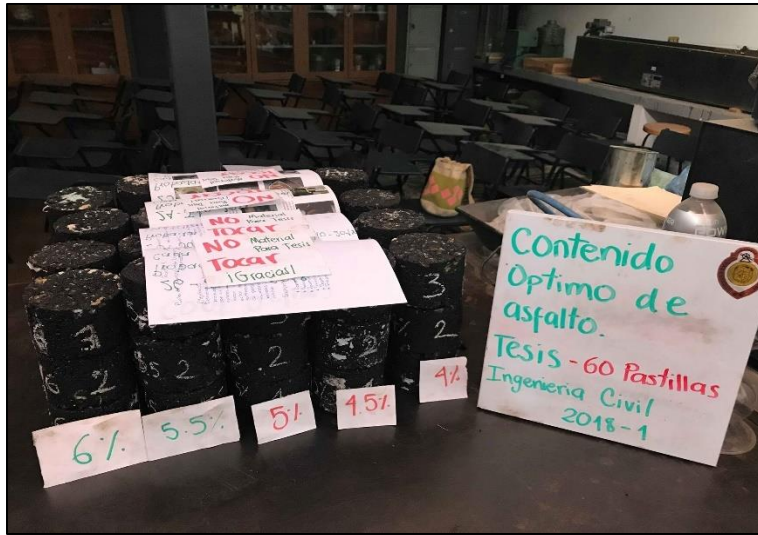
Fuente: Propia

Una vez realizados los procesos anteriormente mencionados se da inicio al cálculo del contenido óptimo de asfalto mediante el método Marshall con la fabricación de 15 pastillas testigo y por cada modificación se realiza nuevamente un diseño Marshall teniendo así, 45 pastillas modificadas, esto con el fin de evaluar el desempeño y comportamiento de las pastillas modificadas con referencia a las testigos.

7.6. FABRICACIÓN DE PASTILLAS

Para la fabricación de las pastillas el proceso se explica en el capítulo 6 correspondiente a la metodología en el apartado 6.3. Como resultado para calcular el contenido óptimo de asfalto se realizaron 60 pastillas, las cuales se puede observar su totalidad en la foto 25. Para ver la serie completa correspondiente a la fabricación de pastillas dirigirse Anexo C, apartado C.1.9, fotos 51 a la 72.

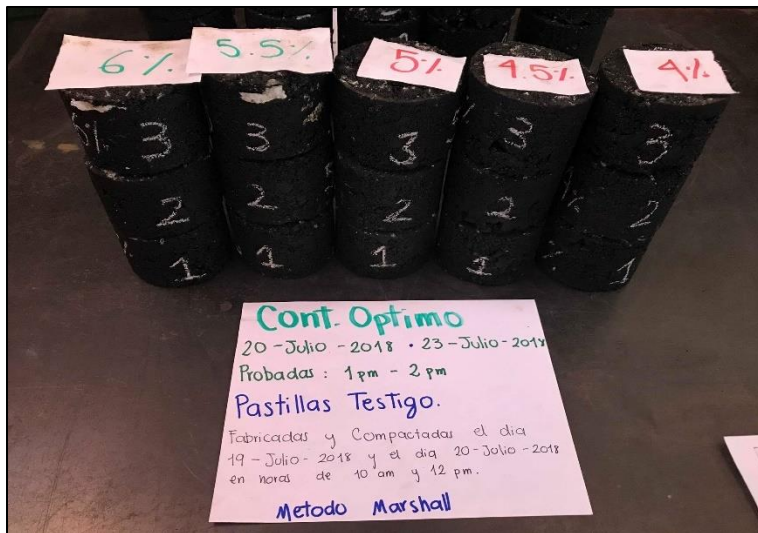
Foto 25. Total de pastillas ensayadas mediante el método Marshall.



Fuente: Propia

Para la distribución de colillas de cigarrillo, cal y agua, se muestra en la tabla 6 anteriormente descrita en el capítulo 6 correspondiente a la metodología. En la foto 26 se puede observar el resultado de las 15 pastillas testigo, estas no tienen ninguna adición.

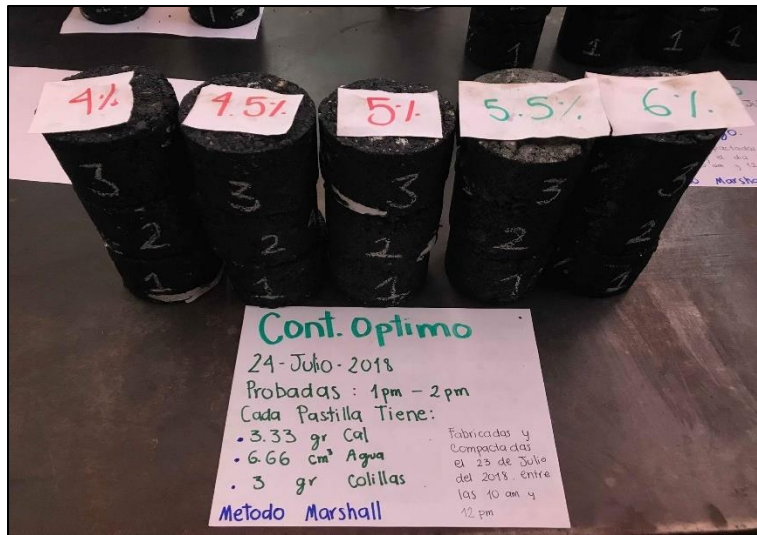
Foto 26. Pastillas testigo ensayadas por el método Marshall.



Fuente: Propia

En la foto 27 se presenta 15 pastillas con modificación las cuales tienen 3.3 g de cal, 6.6 cm³ de agua y 3 g de colillas de cigarrillo, además con su respectivo contenido de asfalto.

Foto 27. Pastillas con modificación No.1 ensayadas por el método Marshall.



Fuente: Propia

En la foto 28 se presenta 15 pastillas con modificación las cuales contienen 5 g de cal, 10 cm³ de agua y 3 g de colillas de cigarrillo, además su respectivo contenido de asfalto.

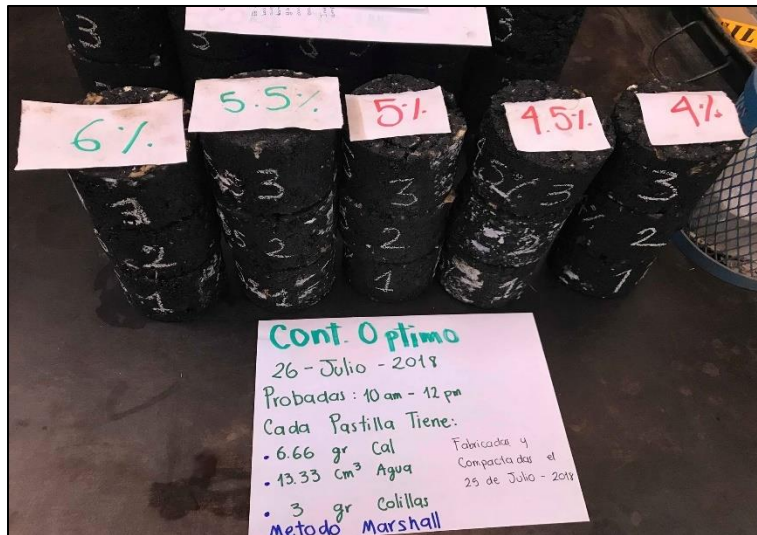
Foto 28. Pastillas con modificación No.2 ensayadas por el método Marshall.



Fuente: Propia

En la foto 29 se presenta las últimas 15 pastillas con modificación, las cuales contienen 6.6 g de cal, 13.3 cm³ de agua y 3 g de colillas de cigarrillo, además del respectivo contenido de asfalto. Esto para completar 45 pastillas modificadas.

Foto 29. Pastillas con modificación No.3 ensayadas por el método Marshall.



Fuente: Propia

7.7. ANALISIS DEL METODO MARSHALL

Para el análisis de la fase cuatro se debe tener en cuenta los resultados obtenidos de los ensayos a las pastillas en la fase tres, posteriormente son insertados en una tabla para ser analizados mediante el método Marshall. Para ver los datos y resultados obtenidos en el laboratorio de la fabricación de las pastillas por el método Marshall ver Anexo B, apartado B.1.9.

De los valores calculados en la fase tres, se tienen en cuenta el peso seco, peso sumergido y dimensiones por cada pastilla, con cada uno de estos valores se calculó lo correspondiente a los vacíos, peso volumétrico, estabilidad y flujo, teniendo en cuenta que a la estabilidad se le realizó una corrección respectivamente con las dimensiones de las pastillas. Lo anteriormente mencionado se presenta a continuación.

Tabla 28. Corrección de los valores de la estabilidad.

Volumen de la probeta, en cm ³	Espesor aproximado de la probeta, en cm	Factor de corrección
200-213	2.54	5.56
214-225	2.70	5.0
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	2.75
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
390-392	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	1.0
523-535	6.61	0.96
536-546	6.67	0.93
547-559	6.82	0.89
560-573	6.98	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

Fuente: Pavimentos Asfálticos Proyecto y Construcción ⁷¹

NOTA: El diseño Marshall se trabajó inicialmente con las normas mexicanas, al momento de realizar los análisis de resultado y compararlo con los criterios de diseño se usó la norma INVIAS ya que este proyecto se presenta inicialmente en Colombia, aun así se realizó un breve análisis de los resultados obtenidos con los criterios de la norma mexicana, donde para ello, las pastillas testigo cumplen con todos los criterios de diseño, esto se repite en las pastillas con modificación, además de tener algunos valores que no cumplen con los rangos, dichos valores son los mismos que no cumple con la norma INVIAS.

⁷¹ MARTIN J. Rogers y WALLACE Hugh A. Pavimentos Asfálticos Proyecto y Construcción. Traducido del inglés por Manuel Velázquez Velázquez. Madrid: Aguilar, 1962. p 267.

A continuación, se presenta un resumen de la tabla Marshall para las pastillas testigo en la cual mediante respectivos cálculos y la realización de las diferentes gráficas se procede a obtener el contenido óptimo de esta.

Tabla 29. Tabla resumen de cálculos del método Marshall para las pastillas testigo.

% de asfalto	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Peso Unitario (kg/m ³)	Vacíos %	VFA	VMA
4	8620,05	2,75	2077	2,94	75%	11,58
4,5	9259,07	3,37	2091	1,98	84%	11,71
5	11761,88	3,16	2114	0,40	97%	11,31
5,5	9578,58	3,64	2012	1,83	87%	13,58
6	9685,08	3,34	2039	1,73	88%	14,49

Fuente: Propia

Para el análisis de los resultados de la tabla Marshall y la determinación del contenido óptimo de asfalto, es necesario revisar los criterios preliminares que debe cumplir un diseño de mezcla densa en caliente. Para dichos criterios se debe tener los siguientes valores presentados en la tabla 30:

Tabla 30. Criterios para el diseño preliminar de una mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall.

CARACTERÍSTICA	NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO	
		CATEGORÍA DE TRÁNSITO				
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)	E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75	
Estabilidad mínima (N)		5,000	7,500 (16,875)	9,000 (33,750)	15,000	
Flujo(mm) (Nota 2)		2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0	
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)		2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)	-	
Vacíos con aire (V _a), % (Nota 3)	Rodadura	E-736	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	4.0 a 6.0	NA
	Intermedia	o	4.0 a 8.0	4.0 a 7.0	4.0 a 7.0	4.0 a 6.0
	Base	E-799	NA	5.0 a 8.0	5.0 a 8.0	4.0 a 6.0
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % mínimo	T. Máx. 38 mm	E-799	13.0			-
	T. Máx. 25 mm		14.0			14.0
	T. Máx. 19 mm		15.0			-
	T. Máx. 10 mm		16.0			-
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %	E-799	65 a 80	65 a 78	65 a 75	63 a 75	
Relación Ulenante / Ligante efectivo, en peso	E-799	0.8 a 1.2			1.2 a 1.4	
Concentración de llenante, valor máximo	E-745	Valor crítico				
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey	-	Reportar				
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo μm	E-741	7.5				

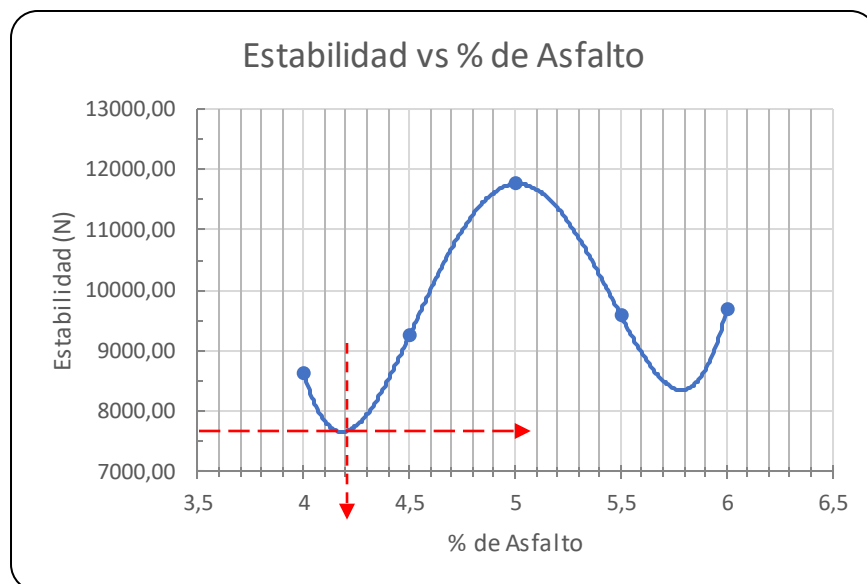
Fuente: Instituto Nacional de Vías⁷²

⁷² INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall. artículo 450-13. Tabla 450-10. Colombia. P. 450-

En las siguientes gráficas se presentan los valores de la tabla 29, cuyas gráficas corresponden a los resultados de la estabilidad, flujo, peso unitario, porcentaje de vacíos, VFA, VMA.

Como se puede observar en la siguiente gráfica 2 de estabilidad vs porcentaje de asfalto y teniendo en cuenta la tabla 30, en donde se encuentran los criterios de diseño para una mezcla asfáltica, el valor de estabilidad mínima para una categoría de tránsito NT2 es de 7500 N y con respecto a los valores de la gráfica se puede observar que para un porcentaje de asfalto de 4.2% se tiene un valor de estabilidad de 7700 N, así cumpliendo con el valor estipulado para los criterios de diseño.

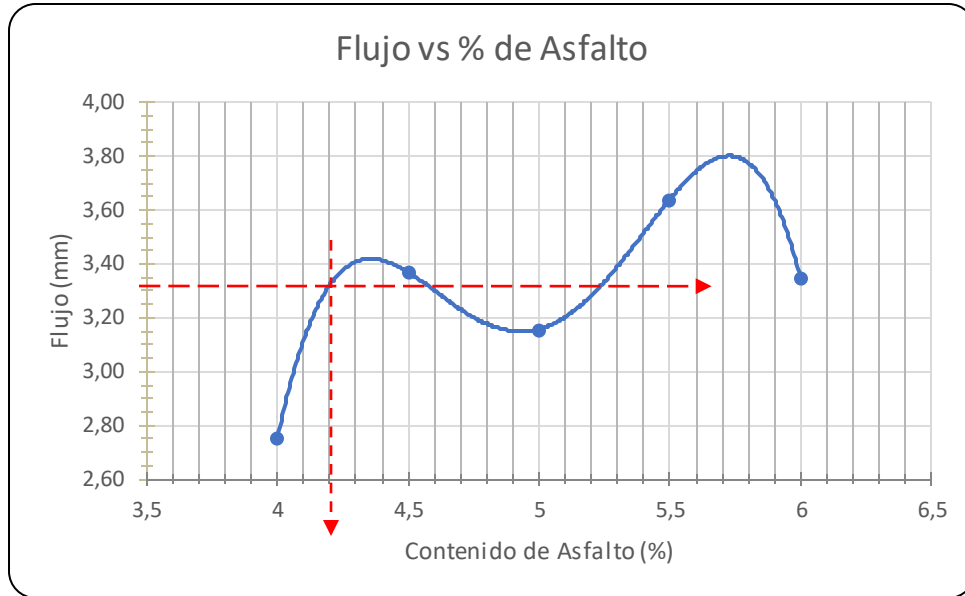
Gráfica 2. Estabilidad vs % de asfalto en pastillas testigo.



Fuente: Propia

Para la gráfica 3 de flujo vs porcentaje de asfalto se observa que para un valor de 4.2% de asfalto se tiene un flujo de 3.32 mm, comparando estos resultados con la tabla 30 en donde se evidencia los criterios de diseño para una mezcla asfáltica, los cuales presentan que para una categoría de tránsito NT2 los rangos de flujo deben estar entre 2.0 mm a 4.0 mm; se analiza que los valores calculados cumplen con los criterios y se encuentra en el rango estipulado.

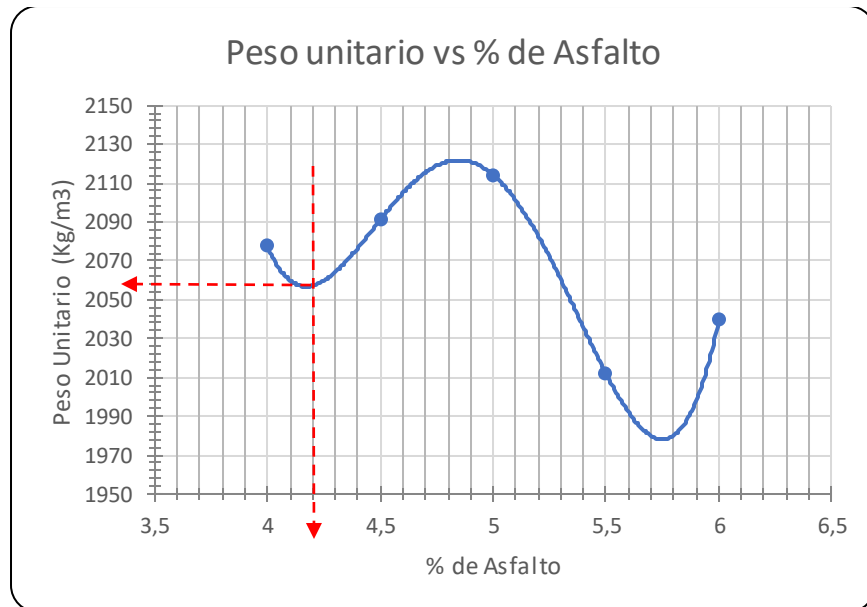
Gráfica 3. Flujo vs % de asfalto en pastillas testigo.



Fuente: Propia

Para la gráfica 4 correspondiente al peso unitario vs porcentaje de asfalto, se observa que para un porcentaje de asfalto de 4.2% se tiene un peso unitario de 2058 kg/m³, indica los valores calculados mediante la gráfica y el porcentaje de asfalto óptimo.

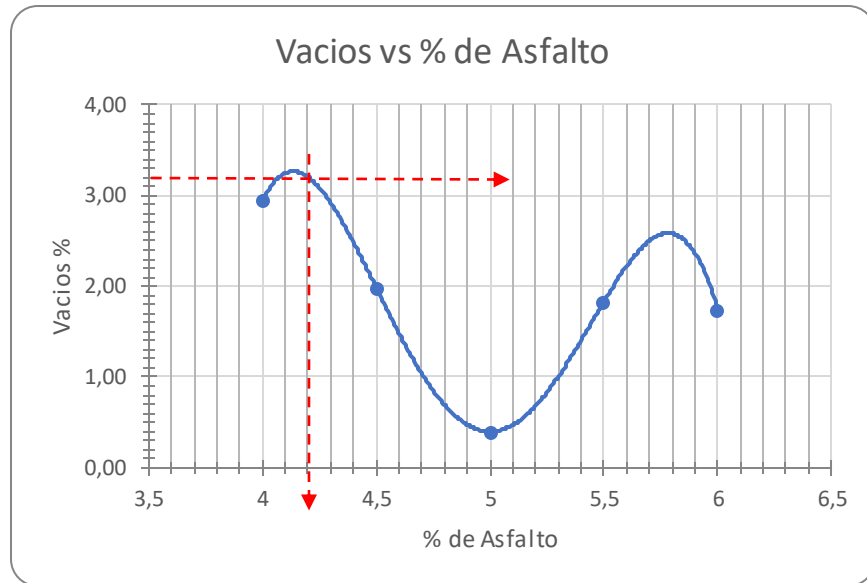
Gráfica 4. Peso unitario vs % de asfalto en pastillas testigo.



Fuente: Propia

La gráfica 5 correspondiente a los vacíos vs porcentaje de asfalto, se evidencia que en un porcentaje de vacíos de 3.20 % corresponde un valor de porcentaje de asfalto de 4.2%; estos valores con respecto a la tabla 30, en donde se presentan los criterios de diseño para una mezcla asfáltica los cuales tiene un rango para una categoría de tránsito NT2 es de 3.0% a 5.0%; con esto, se analiza que el valor estipulado en las gráficas cumple con el criterio de diseño.

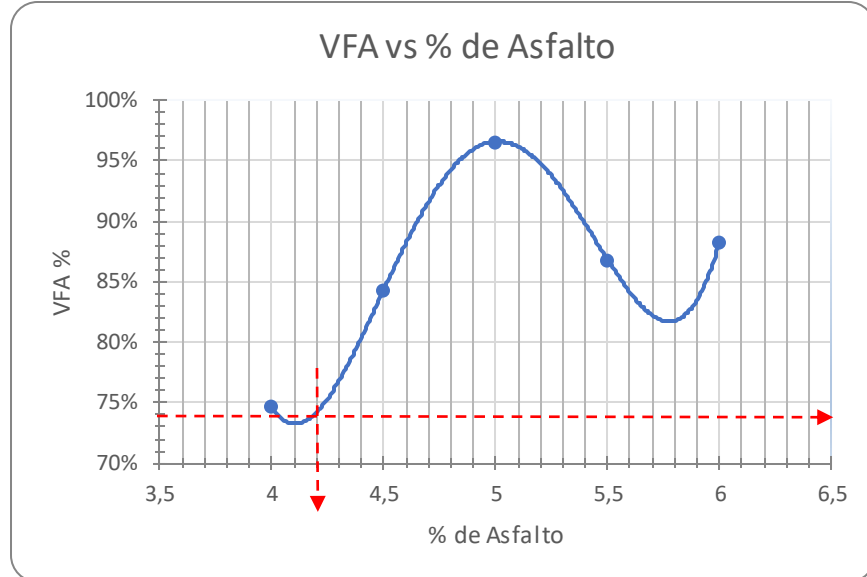
Gráfica 5. Vacíos vs % de asfalto en pastillas testigo.



Fuente: Propia

Para el análisis de la gráfica 6 correspondiente al VFA vs porcentaje de asfalto se debe tener en cuenta la tabla 30, en donde se presentan los criterios de diseño de una mezcla asfáltica para una categoría de tránsito NT2, el VFA debe estar en un rango de 65% a 78% respectivamente, la gráfica presenta que para un porcentaje de asfalto de 4.2% se tiene un valor de VFA del 74% cumpliendo estos valores con los criterios de diseño estipulados.

Gráfica 6. VFA vs % de asfalto en pastillas testigo.



Fuente: Propia

Para el análisis de la gráfica 7 del VMA vs porcentaje de asfalto se debe tener en cuenta la tabla 30 que corresponde a los criterios de diseño para una mezcla asfáltica los cuales son para una categoría de tránsito NT2, un VMA con tamaño máximo de 25 mm corresponde a un 14% de vacíos en los agregados minerales y un porcentaje de asfalto de 5.58% como se puede observar en la gráfica; pero se necesita un porcentaje de 4.2% de asfalto lo cual requiere un valor de VMA del 12.20%, estando este valor fuera de los criterios de diseño.

Por otro lado, mediante la tabla 31 en donde se presentan los valores de los vacíos en el agregado mineral VMA para una granulometría densa mediante las tablas de la SCT (Secretaría de Comunicación y Transporte) el cual presenta los requisitos de calidad para el país de México en una mezcla asfáltica, se evidencia que para un tamaño nominal de 19 mm o $\frac{3}{4}$ " existe un porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica de diseño los cuales son: 3%, 4%, 5%, y teniendo en cuenta que el valor obtenido para los vacíos de la mezcla es de 3.20% esto indica que el porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral VMA es de 12%; por lo tanto, para un porcentaje de asfalto 4.2 % nos requiere un VMA de 12.20 %, así, cumpliendo este valor con los requisitos de calidad para una granulometría densa por el método Marshall.

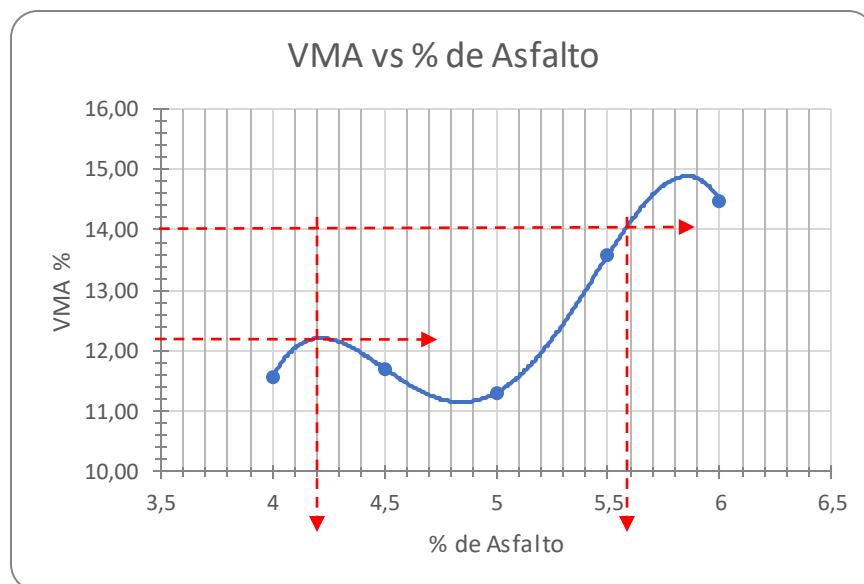
Tabla 31. Vacíos en el agregado mineral (VMA) para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall

Tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla ^[1]		Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC) de diseño		
		%		
mm	Designación	3	4	5
		Vacíos en el agregado mineral (VAM)		
		%, mínimo		
9,5	3/8"	14	15	16
12,5	1/2"	13	14	15
19	3/4"	12	13	14
25	1"	11	12	13
37,5	1 1/2"	10	11	12

[1] El tamaño nominal corresponde al indicado en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, para el tipo y granulometría del material pétreo utilizado en la mezcla.

Fuente: N-CMT-4-05-003/02⁷³

Gráfica 7. VMA vs % de asfalto en pastillas testigo.



Fuente: Propia

Con respecto a cada uno de los valores presentados existe un porcentaje de asfalto de 4.2% como el contenido óptimo el cual cumple con todos los valores presentados y con los valores de los criterios de diseño para una mezcla asfáltica.

Una vez terminado el análisis de las pastillas testigo se procede con las primeras pastillas modificadas, en donde se presentará cada una de las tablas y gráficas que las comprenden para su respectivo análisis. A continuación, en la tabla 32 se presenta el resumen de los resultados plasmados en la tabla Marshall.

⁷³ CMT CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. Calidad de mezclas asfálticas para carreteras. N-CMT-4-05-003/02. Estados Unidos mexicanos, p.6.

Tabla 32. Tabla resumen de cálculos del método Marshall para las pastillas con modificación No. 1

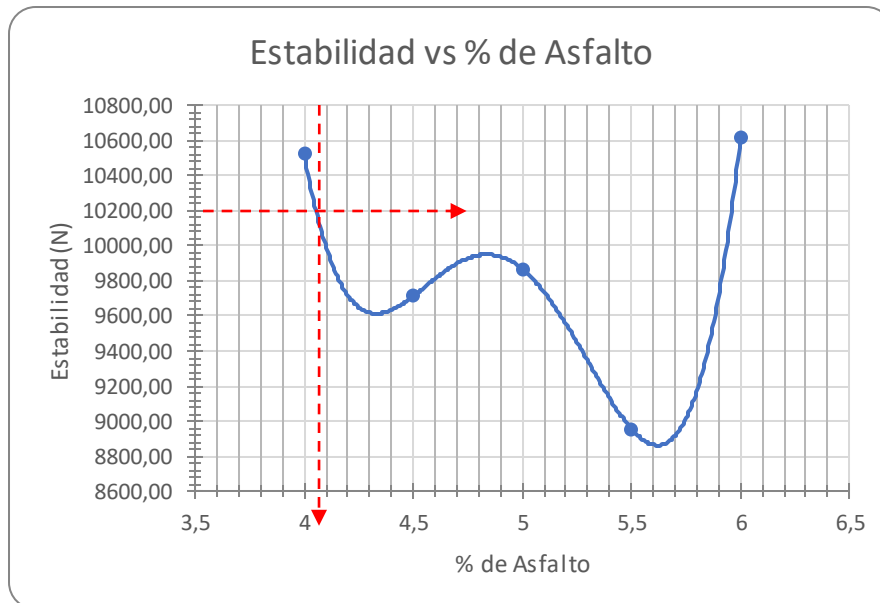
MODIFICACIÓN No. 1 3 g de colillas, 3.33 g de cal y 6.66 ml de agua	% de asfalto	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Peso unitario (kg/m ³)	Vacíos %	VFA %	VMA%
	4	10524,25	3,23	2187	3,05	74%	11,68
	4,5	9714,21	3,68	1735	22,31	26%	30,02
	5	9866,09	3,68	1752	21,06	29%	29,70
	5,5	8954,79	5,49	2186	1,22	91%	13,04
	6	10625,51	5,49	2153	1,12	92%	13,96

Fuente: Propia

En las siguientes gráficas se presentan los valores de la tabla 32, cuyas gráficas corresponden a los resultados de la estabilidad, flujo, peso unitario, porcentaje de vacíos, VFA, VMA.

Como se puede observar en la gráfica 8 correspondiente a la estabilidad vs porcentaje de asfalto y teniendo en cuenta la tabla 30, en donde se encuentran los criterios de diseño para una mezcla asfáltica, el valor de estabilidad mínima para una categoría de tránsito NT2 es de 7500 N y con respecto a la gráfica se puede observar que para un porcentaje de asfalto de 4.06% se tiene un valor de estabilidad de 10200 N muy superior a los 7500 N, de esta manera se cumple con el valor estipulado para los criterios de diseño de mezcla asfáltica.

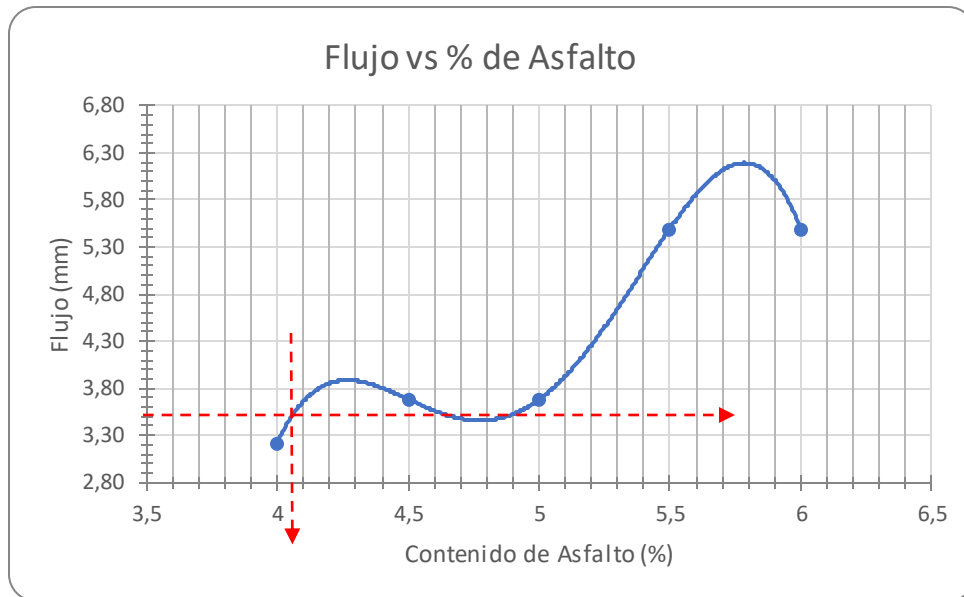
Gráfica 8. Estabilidad vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1



Fuente: Propia

Para la gráfica 9 correspondiente al flujo vs porcentaje de asfalto y teniendo en cuenta la tabla 30, en donde se encuentran los criterios de diseño para una mezcla asfáltica, los valores de flujo correspondientes para una categoría de tránsito NT2 son de 2.0 mm a 4.0 mm y con respecto a la gráfica se puede analizar que para un valor del porcentaje de asfalto de 4.06 % se tiene un flujo cuyo valor es de 3.50 mm, cumpliendo con lo estipulado para los criterios de diseño de una mezcla asfáltica.

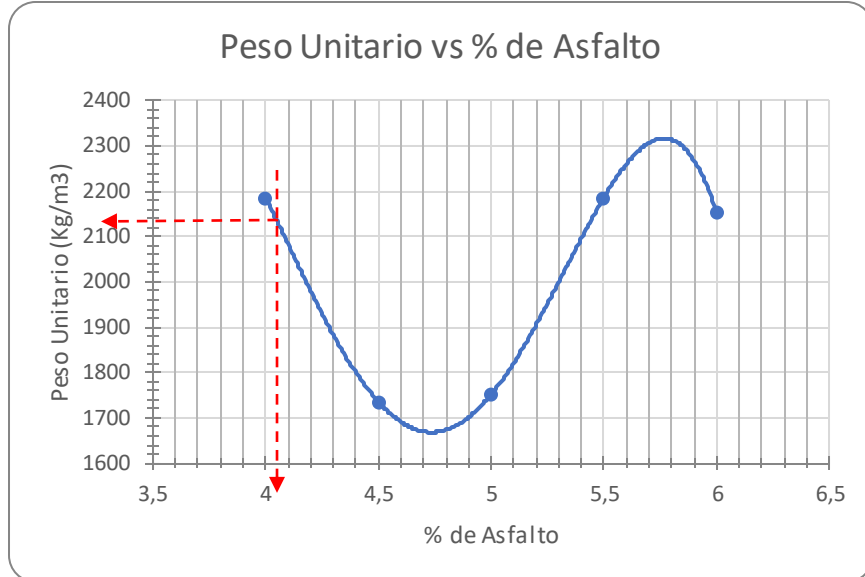
Gráfica 9. Flujo vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1.



Fuente: Propia

Para la gráfica 10 correspondiente al peso unitario vs porcentaje de asfalto, se puede evidenciar que para un porcentaje de asfalto de 4.06% se logra un valor de peso unitario del 2130 kg/m³, lo cual indica los valores obtenidos mediante la gráfica y cuyo porcentaje de asfalto es óptimo.

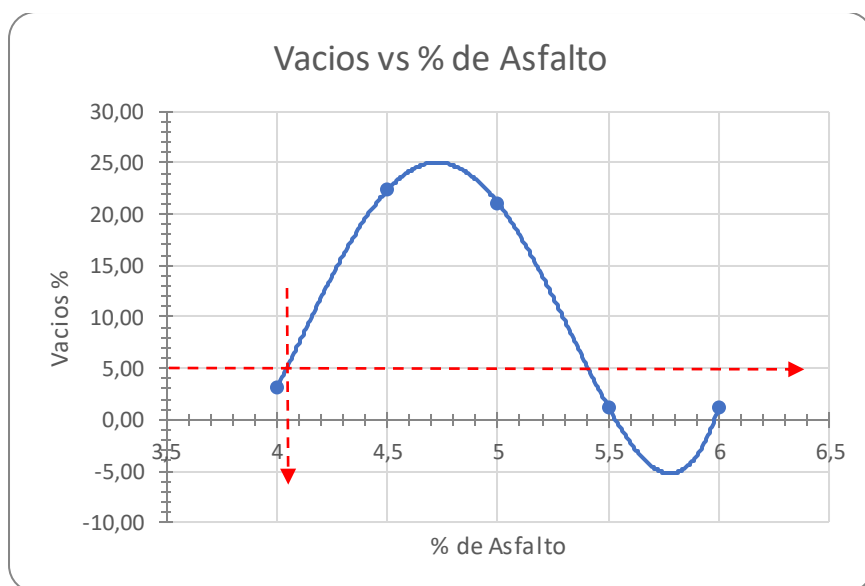
Gráfica 10. Peso unitario vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1



Fuente: Propia

En la gráfica 11 correspondiente al porcentaje de vacíos vs porcentaje de asfalto, se puede evidenciar que en un porcentaje de vacíos de 5,0 % se obtiene un valor de asfalto de 4,06%; estos valores con respecto a la tabla 30, en donde se presentan los criterios de diseño para una mezcla asfáltica los cuales tiene un rango para una categoría de tránsito NT2 de 3,0% a 5,0%; con esto, se analiza que el valor estipulado en la gráfica para el porcentaje de vacíos cumple con el criterio máximo de diseño.

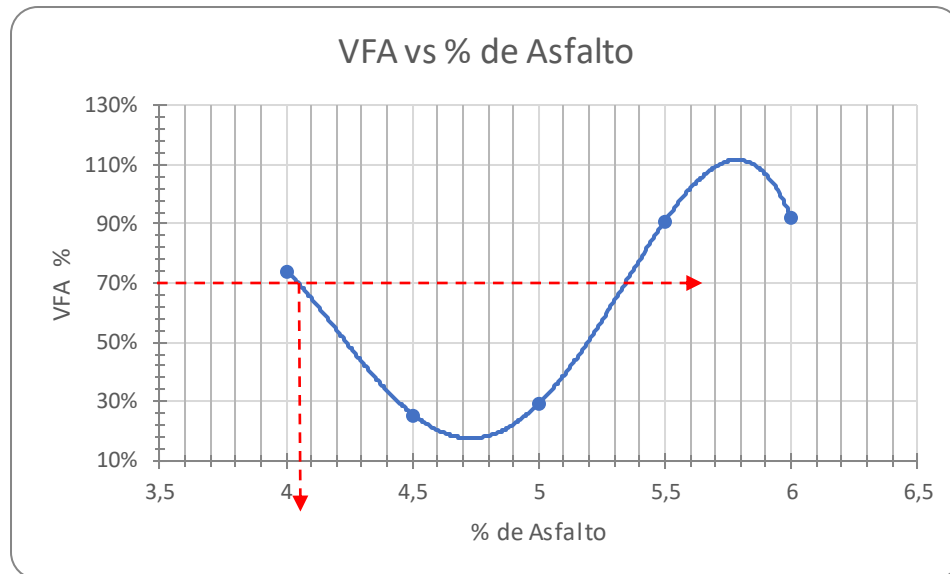
Gráfica 11. Vacíos vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1



Fuente: Propia

En el análisis de la gráfica 12 correspondiente al VFA vs porcentaje de asfalto, se debe tener en cuenta la tabla 30, en donde se presentan los criterios de diseño de una mezcla asfáltica para una categoría de tránsito NT2 el cual presenta que para el VFA debe estar en un rango de 65% a 78% respectivamente, la gráfica presenta que para un porcentaje de asfalto de 4.06% se tiene un valor del VFA de 70% cumpliendo este valor con los criterios de diseño estipulados.

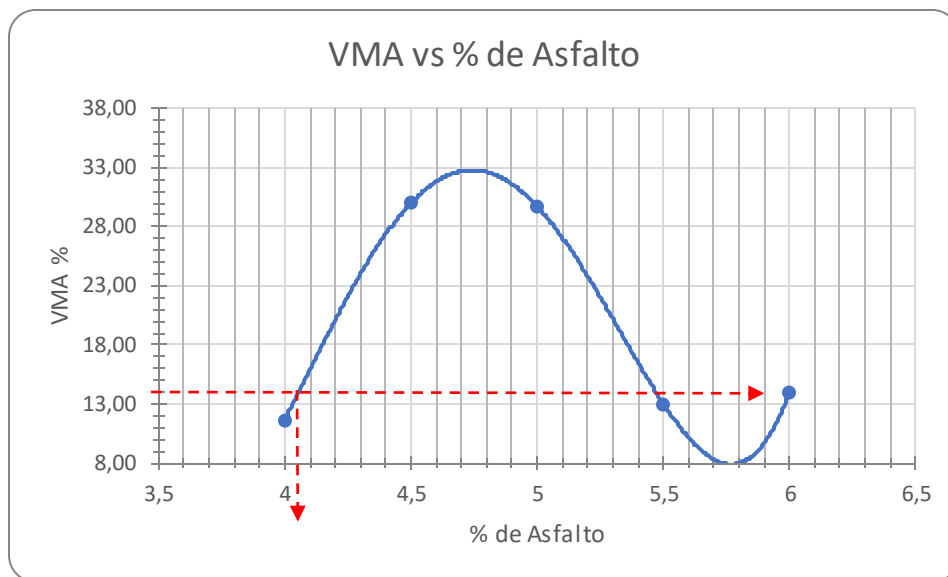
Gráfica 12. VFA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1



Fuente: Propia

Para el análisis de la gráfica 13 correspondiente al VMA vs porcentaje de asfalto se debe tener en cuenta la tabla 30, que corresponde a los criterios de diseño para una mezcla asfáltica, los cuales son para una categoría de tránsito NT2; un VMA con tamaño máximo de 25 mm corresponde a un valor del 14% de vacíos en los agregados minerales y con un porcentaje de asfalto de 4.06% como se puede observar en la gráfica; de esta manera se analiza que el valor VMA está cumpliendo con los requisitos estipulados para criterios de diseño de mezcla asfáltica.

Gráfica 13. VMA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.1



Fuente: Propia

Con respecto a cada uno de los valores presentados existe un porcentaje de asfalto de **4.06%** como el óptimo, siendo este porcentaje de asfalto el estipulado para que cada valor cumpla con los criterios de diseño para una mezcla asfáltica.

En la tabla 33 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de las pastillas testigo y las pastillas con modificación No.1 para su debido análisis. Se puede evidenciar que el contenido óptimo de asfalto disminuyó 0.14%; la estabilidad aumentó de 7700 N a 10200 N que corresponde a un 32.46%, lo que quiere decir que hay mayor resistencia a la deformación de la mezcla en las pastillas con modificación No.1; el flujo se vio aumentado por 0.15 mm correspondiente a un 4.48%, lo que significa que hay mayor deformación bajo carga en las pastillas con modificación No.1; el peso unitario se vio aumentado en las pastillas con modificación No.1 en un 3.5%, este aumento se puede justificar debido a la adición de las colillas de cigarrillo. En el análisis de los vacíos se aumentó de 1.80 %, esto quiere decir que las pastillas con modificación No.1 tienen mayores bolsas de aire que se encuentran entre las partículas del agregado revestidas de asfalto. De igual manera, este aumento se puede justificar debido a que menor contenido de asfalto mayor porcentaje de vacíos; el VFA tuvo una disminución del 4%, lo que quiere decir que en las pastillas con modificación No.1 hay menos vacíos llenos de asfalto, lo que permite interpretar, que hay menos contenido de asfalto comparado con las pastillas testigo; para el VMA se vio aumentado el porcentaje lo que corresponde que en las pastillas con modificación No.1 hay más vacíos en el agregado mineral que es lo correspondiente a los criterios de diseño.

Tabla 33. Tabla resumen de resultados del contenido óptimo de asfalto.

Pastillas	% de asfalto	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Peso unitario (kg/m ³)	Vacíos %	VFA %	VMA %
TESTIGO	4.2	7700	3.35	2058	3.20	74	12.20
MODIFICACIÓN No. 1 3 g de colillas, 3.33 g de cal y 6.66 ml de agua	4.06	10200	3.50	2130	5.0	70	14

Fuente: Propia

Una vez terminado el análisis de las pastillas con modificación No.1 se procede con las pastillas con modificación No.2, en donde se presentará cada una de las tablas y gráficas que las comprenden para su respectivo análisis. A continuación, se mostrará en la tabla 34 un resumen de los resultados plasmados en la tabla Marshall.

Tabla 34. Tabla resumen de cálculos del método Marshall para las pastillas con modificación No. 2

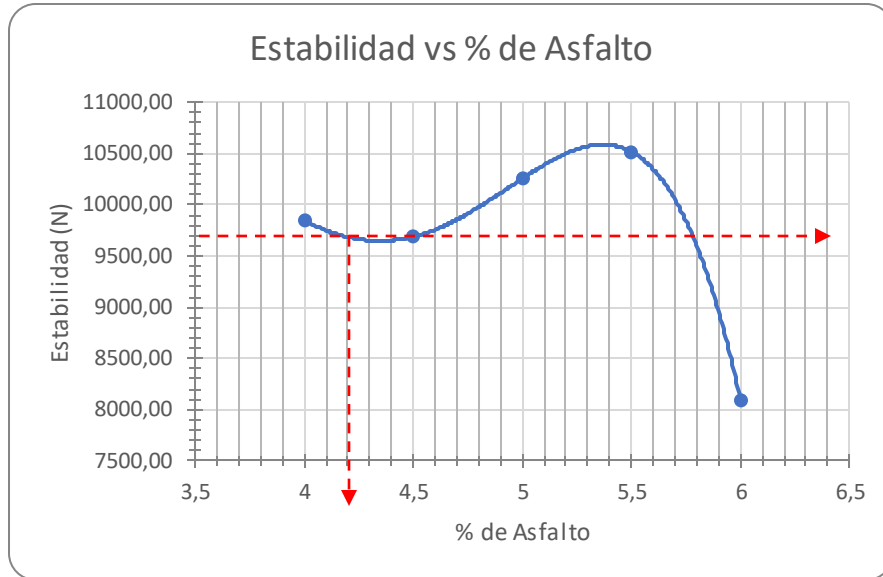
	% de asfalto	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Peso unitario (kg/m ³)	Vacíos %	VFA %	VMA %
MODIFICACIÓN No. 2 3 g de colillas, 5.0 g de cal y 10.0 ml de agua	4	9844,71	3,34	2189	2,75	76%	11,41
	4,5	9689,98	3,85	2188	2,10	82%	11,82
	5	10257,32	4,06	2184	1,21	90%	12,03
	5,5	10515,20	6,21	2190	1,46	89%	13,25
	6	8091,10	6,21	2034	3,21	80%	15,78

Fuente: Propia

En las siguientes gráficas se presentan los valores de la tabla 34, cuyas gráficas corresponden a los resultados de la estabilidad, flujo, peso unitario, porcentaje de vacíos, VFA, VMA.

Como se puede observar en la gráfica 14 correspondiente a la estabilidad vs porcentaje de asfalto, teniendo en cuenta la tabla 30, se encuentran los criterios de diseño para una mezcla asfáltica, presentando el valor de estabilidad mínima para una categoría de tránsito NT2 de 7500 N, y con respecto a la gráfica se puede observar que para un porcentaje de asfalto de 4.2% se tiene un valor de estabilidad de 9700 N superior a los 7500 N, de esta manera se cumple con el valor estipulado para los criterios del diseño de mezcla asfáltica.

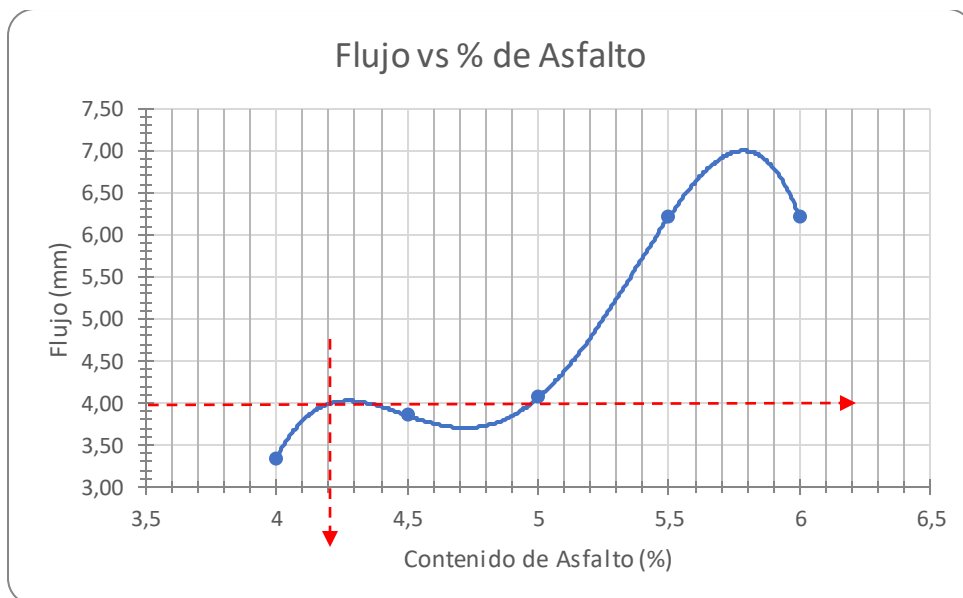
Gráfica 14. Estabilidad vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2



Fuente: Propia

En la gráfica 15 correspondiente al flujo vs porcentaje de asfalto teniendo en cuenta la tabla 30, en donde se encuentran los criterios de diseño para una mezcla asfáltica, los valores de flujo correspondientes para una categoría de tránsito NT2 son de 2.0 mm a 4.0 mm y con respecto a la gráfica se puede analizar que para un porcentaje de asfalto de 4.2% se tiene un valor del flujo de 3.95 mm, cumpliendo con los valores estipulado para los criterios de diseño de una mezcla asfáltica.

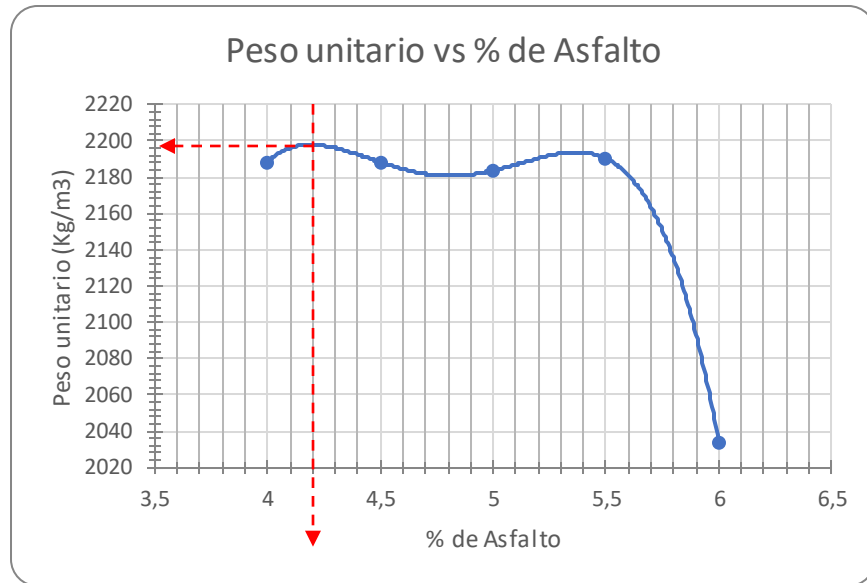
Gráfica 15. Flujo vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2



Fuente: Propia

Para la gráfica 16 correspondiente al peso unitario vs porcentaje de asfalto, se puede apreciar que para un porcentaje de asfalto de 4.2% se logra un peso unitario de 2196 kg/m³, lo cual indica los valores obtenidos mediante la gráfica y cuyo porcentaje de asfalto óptimo.

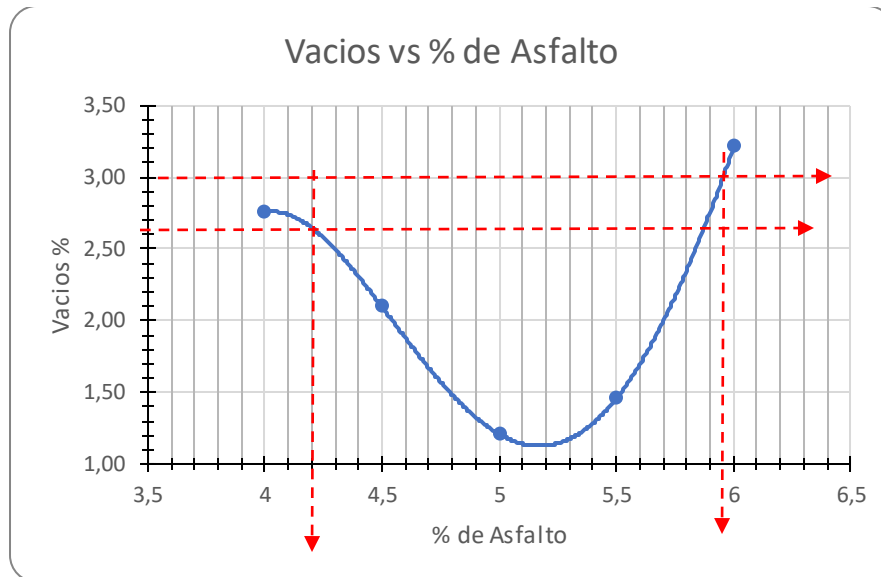
Gráfica 16. Peso unitario vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2



Fuente: Propia

La gráfica 17 correspondiente al porcentaje de vacíos vs porcentaje de asfalto, se evidencia que en un porcentaje de vacíos de 3.0 % se obtiene un valor de asfalto de 5.95%; para un porcentaje de asfalto de 4.2 % debe tener un porcentaje de vacíos de 2.66 % estos valores con respecto a la tabla 30 en donde se presentan los criterios de diseño para una mezcla asfáltica, los cuales tiene un rango para una categoría de tránsito NT2 de 3.0% a 5.0%; con esto, se analiza que el valor estipulado en la gráfica para el porcentaje de vacíos cumplen con los criterios de diseño con un porcentaje de asfalto de 5.99%, pero no cumple con el porcentaje óptimo de asfalto elegido que debe ser de 4.2% para lo cual el valor del porcentaje de vacíos es de 2.64% inferior a el requisito mínimo.

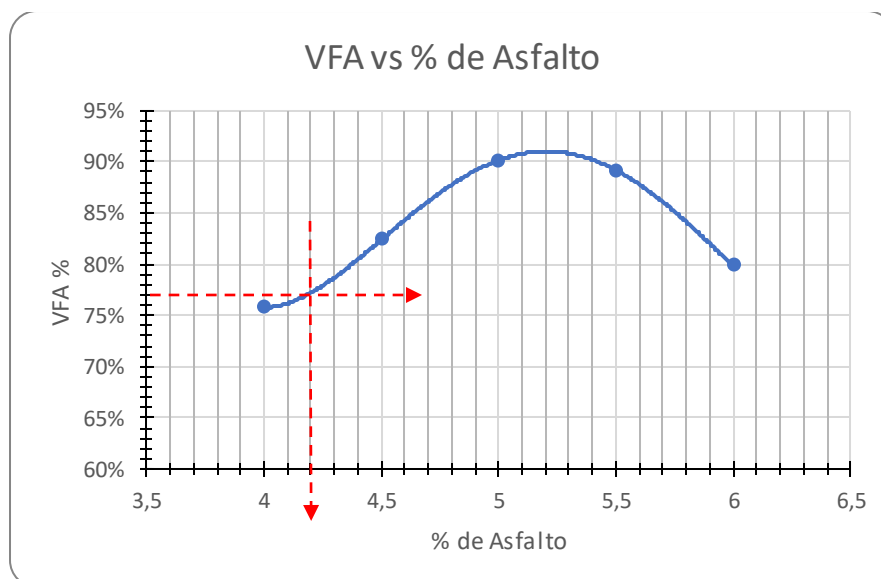
Gráfica 17. Vacíos vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2



Fuente: Propia

Para el análisis de la gráfica 18 correspondiente al VFA vs porcentaje de asfalto, se debe tener en cuenta la tabla 30 en donde se presentan los criterios de diseño de una mezcla asfáltica para una categoría de tránsito NT2 el cual presenta que para el valor del VFA debe estar en un rango de 65% a 78% respectivamente, la gráfica presenta que para un porcentaje de asfalto de 4.2% se tiene un valor VFA de 77% cumpliendo estos valores con los criterios de diseño estipulados.

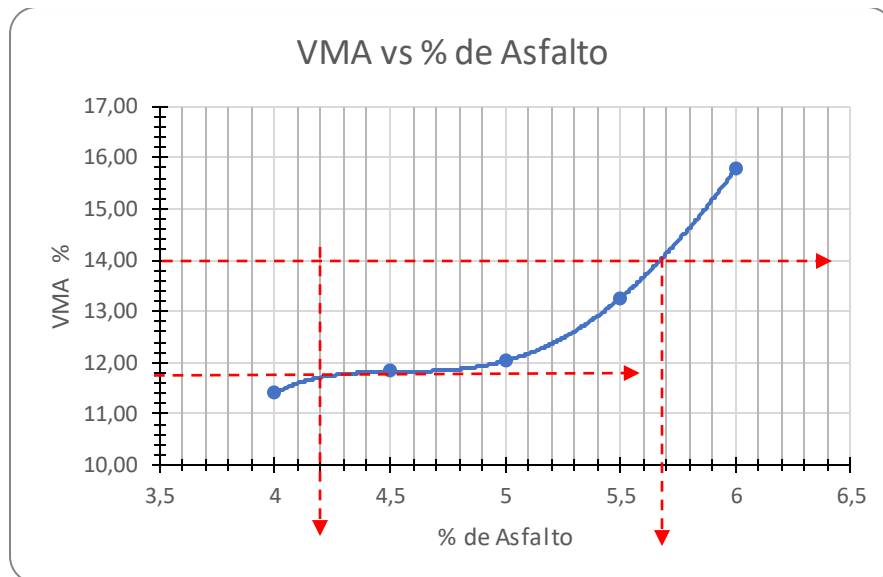
Gráfica 18. VFA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2



Fuente: Propia

Para el análisis de la gráfica 19 correspondiente al VMA vs porcentaje de asfalto se debe tener en cuenta la tabla 30, que corresponde a los criterios de diseño para una mezcla asfáltica los cuales son para una categoría de tránsito NT2, un VMA con tamaño máximo de 25 mm corresponde a un 14% de vacíos en los agregados minerales y con un porcentaje de asfalto de 5.69% como se puede observar en la gráfica; de esta manera se analiza que el VMA está cumpliendo con los requisitos estipulados para criterios de diseño de mezcla asfáltica, pero estos valores no cumplen con el porcentaje óptimo elegido que es de 4.2%, puesto que el valor para el VMA disminuye a 11.80%.

Gráfica 19. VMA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.2



Fuente: Propia

Con respecto a cada uno de los valores presentados existe un porcentaje de asfalto de **4.2%** como el óptimo el cual hace cumplir con los valores de 4 de las 6 gráficas, entre ellas está el VFA, peso unitario, flujo y estabilidad, y los valores de las gráficas restantes como lo son, VMA y porcentaje de vacíos tiene un porcentaje de asfalto diferente el cual las hace cumplir con los criterios de diseño pero no con el porcentaje de asfalto óptimo seleccionado, de esta manera, se analiza que no todos los valores expuestos en las gráficas pudieron cumplir con un mismo porcentaje de asfalto.

En la tabla 35 se puede evidenciar un resumen de los resultados obtenidos de las pastillas testigo y las pastillas con modificación No.2 para su debido análisis. Se puede apreciar que el contenido óptimo de asfalto es el mismo contenido de asfalto que las pastillas testigo; la estabilidad aumento de 7700 N valor de las pastillas testigo a 9700 N valor de las modificadas No. 2 que corresponde a un aumento del 26%, lo que quiere decir que hay una mayor resistencia a la deformación de la mezcla en las pastillas con modificación No.2 en comparación a las pastillas testigo. El flujo se vio aumentado por

0.65 mm, es decir un 17.91% de las modificadas No. 2 con respecto a las pastillas testigo, lo que significa que hay mayor deformación bajo carga en las pastillas con modificación No.2; el peso unitario se vio aumentado un 6.70% en las pastillas con modificación No.2, este aumento se puede justificar debido a la adición de las colillas de cigarrillo ya que al mismo tiempo aumentó la cantidad de cal y agua.

En el análisis de los vacíos se vio una disminución a comparación con las pastillas testigo que tuvieron el mismo contenido óptimo de asfalto, los vacíos NO cumplen con los límites presentados en los criterios de diseño; el VFA tuvo un aumento del 3% en las pastillas modificadas No. 2, lo que quiere decir que en las pastillas con modificación No.2 hay más vacíos llenos de asfalto, comparado con las pastillas testigo; para el VMA se vio disminuido el porcentaje lo que corresponde que en las pastillas con modificación No.2 hay menos vacíos en el agregado mineral, pero este valor NO cumple los criterios de diseño.

Tabla 35. Tabla resumen de resultados del contenido óptimo de asfalto.

Pastillas	% de asfalto	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Peso unitario(kg/m ³)	Vacíos %	VFA %	VMA %
TESTIGO	4.2	7700	3.35	2058	3.20	74	12.20
MODIFICACIÓN No. 2 3 g de colillas, 5.0 g de cal y 10.0 ml de agua	4.2	9700	3.95	2196	2.66	77	11.80

Fuente: Propia

Una vez terminado el análisis de las pastillas con modificación No.2 se procede con las pastillas con modificación No.3, en donde se presentará cada una de las tablas y gráficas que las comprenden para su respectivo análisis. A continuación, se mostrará en la tabla 36 un resumen de los resultados plasmados en la tabla Marshall.

Tabla 36. Tabla resumen de cálculos del método Marshall para las pastillas con modificación No. 3

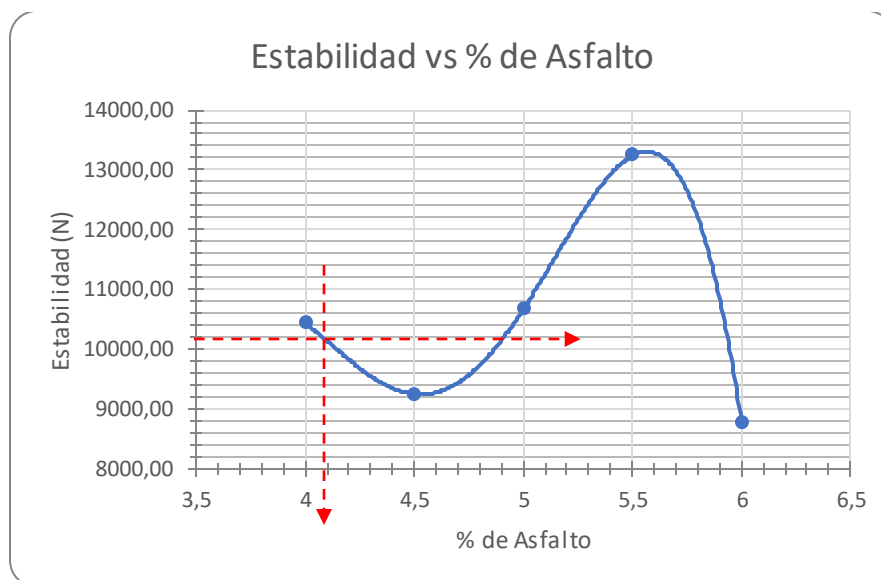
MODIFICACIÓN No. 3 3 g de colillas, 6.66 g de cal y 13.33 ml de agua	% de asfalto	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Peso unitario (kg/m ³)	Vacíos %	VFA %	VMA%
	4	10431,10	3,26	2113	3,06	74%	11,69
	4,5	9249,52	3,56	2221	1,95	84%	11,69
	5	10677,26	3,18	2250	0,18	99%	11,11
	5,5	13237,34	7,45	2084	2,87	81%	14,49
	6	8757,20	7,45	1881	6,83	64%	18,92

Fuente: Propia

En las siguientes gráficas se presentan los valores de la tabla 36, cuyas gráficas corresponden a los resultados del porcentaje de vacíos, VMA, VFA, peso unitario, estabilidad y flujo para las pastillas con modificación No.3.

Como se puede observar en la gráfica 20 correspondiente a la estabilidad vs porcentaje de asfalto, teniendo en cuenta la tabla 30, en donde se encuentran los criterios de diseño para una mezcla asfáltica presentando el valor de estabilidad mínima para una categoría de tránsito NT2 de 7500 N y con respecto a la gráfica se puede observar que para un porcentaje de asfalto de 4.08% se tiene un valor de estabilidad de 10200 N superior a los 7500 N; de esta manera, se cumple con el valor estipulado para los criterios de diseño de mezcla asfáltica.

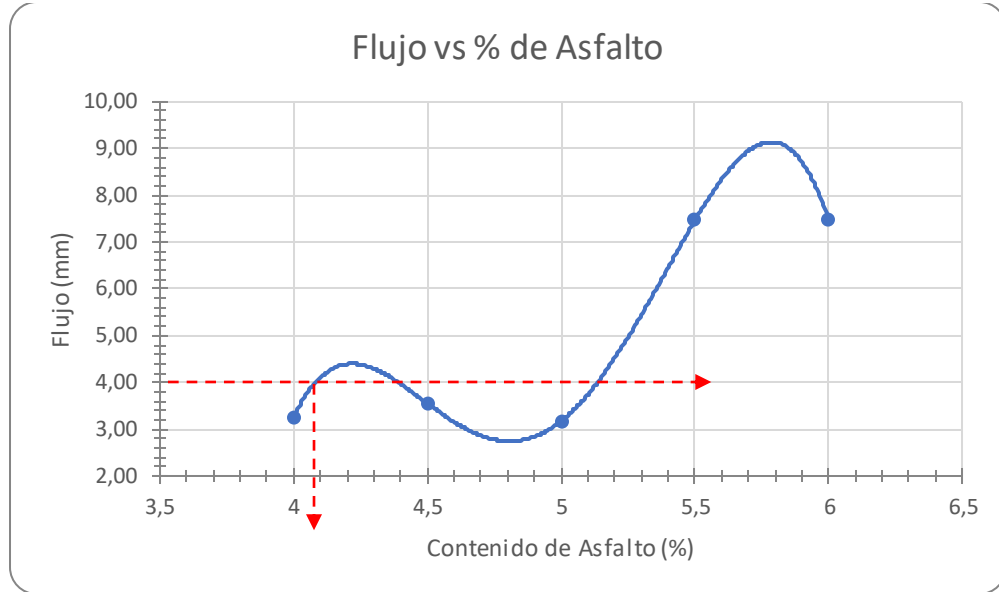
Gráfica 20. Estabilidad vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3



Fuente: Propia

Como se puede observar en la gráfica 21 de flujo vs porcentaje de asfalto, teniendo en cuenta la tabla 30, en donde se encuentran los criterios de diseño para una mezcla asfáltica, los valores de flujo correspondientes para una categoría de tránsito NT2 son de 2.0 mm a 4.0 mm y con respecto a la gráfica se puede analizar que para un porcentaje de asfalto de 4.08% se tiene un flujo cuyo valor es de 4.0 mm, cumpliendo con los valores estipulados para los criterios de diseño de una mezcla asfáltica.

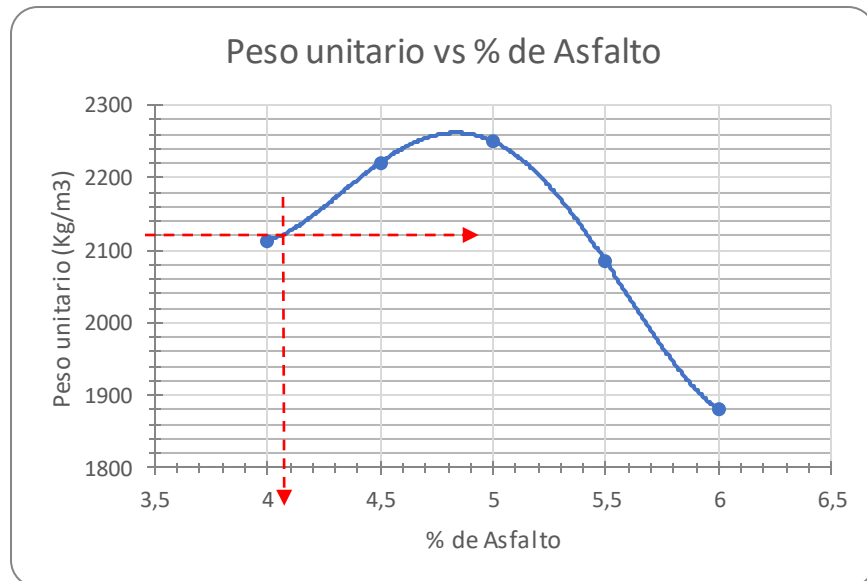
Gráfica 21. Flujo vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3



Fuente: Propia

Para la gráfica 22 correspondiente al peso unitario vs porcentaje de asfalto, se puede apreciar que para un porcentaje de asfalto de 4.08% se logra un valor de peso unitario de 2120 kg/m³, lo cual indica los valores obtenidos mediante la gráfica y porcentaje de asfalto óptimo.

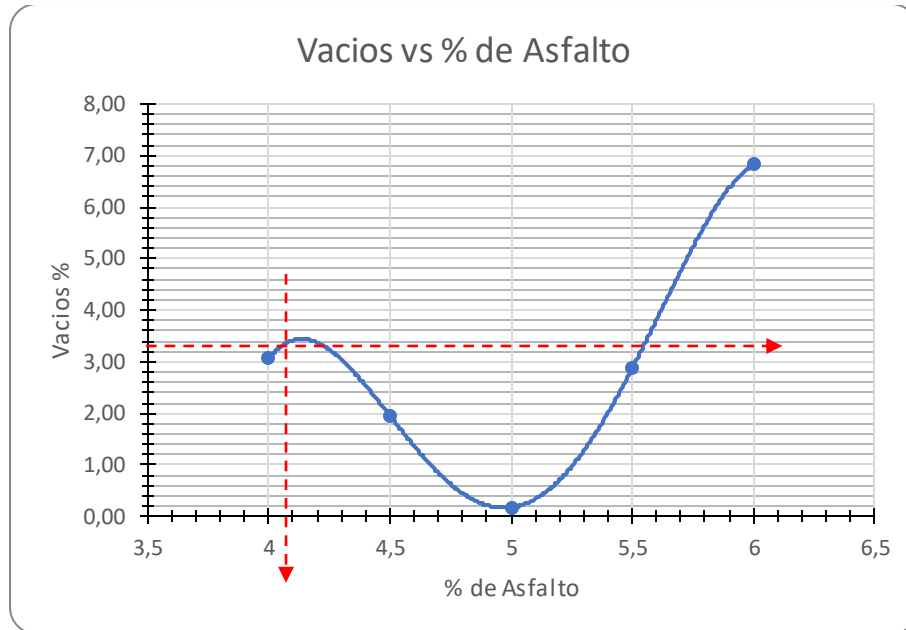
Gráfica 22. Peso unitario vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3



Fuente: Propia

La gráfica 23 correspondiente al porcentaje de vacíos vs porcentaje de asfalto, se evidencia que en un porcentaje de vacíos de 3.35 % se obtiene un valor de asfalto de 4.08%; estos valores con respecto a la tabla 30, en donde se presentan los criterios de diseño para una mezcla asfáltica los cuales tiene un rango para una categoría de tránsito NT2 de 3.0% a 5.0%; con esto, se analiza que el valor estipulado en la gráfica para el porcentaje de vacíos cumple con los criterios de diseño.

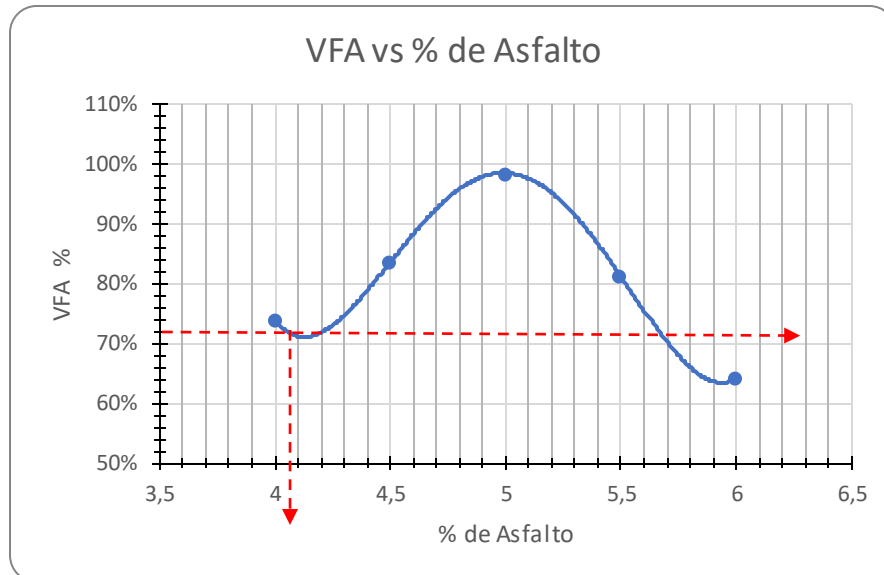
Gráfica 23. Vacíos vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3



Fuente: Propia

Para el análisis de la gráfica 24 correspondiente al VFA vs porcentaje de asfalto, se debe tener en cuenta la tabla 30, en donde se presentan los criterios de diseño de una mezcla asfáltica para una categoría de tránsito NT2 el cual presenta que para el VFA debe estar en un rango de 65% a 78% respectivamente, la gráfica presenta que para un porcentaje de asfalto de 4.08% se tiene un valor VFA de 72% cumpliendo estos valores con los criterios de diseño estipulados.

Gráfica 24. VFA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3

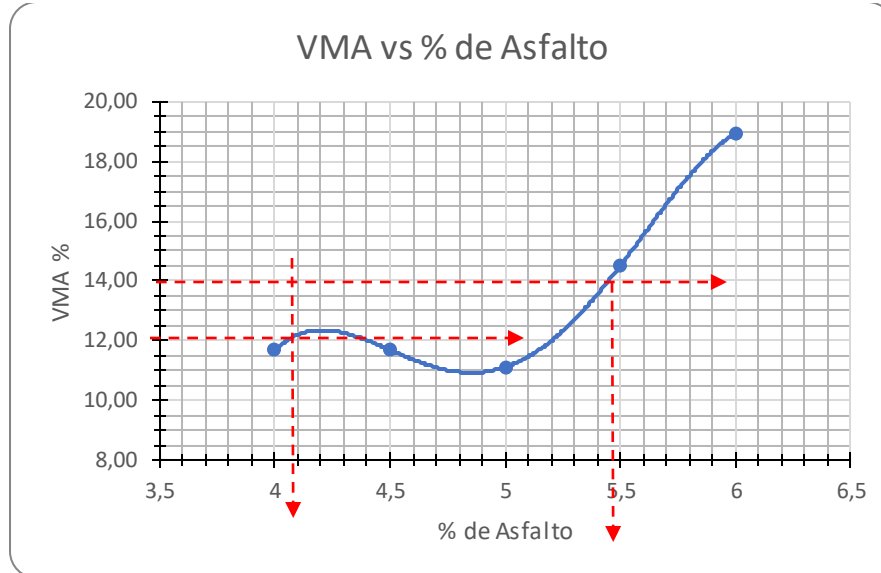


Fuente: Propia

Para el análisis de la gráfica 25 del VMA vs porcentaje de asfalto se debe tener en cuenta la tabla 30 que corresponde a los criterios de diseño para una mezcla asfáltica los cuales son para una categoría de tránsito NT2, un VMA con tamaño máximo de 25 mm corresponde a un 14% de vacíos en los agregados minerales con un porcentaje de asfalto de 5.48% como se puede observar en la gráfica; de esta manera se analiza que el VMA está cumpliendo con los requisitos estipulados para los criterios de diseño de mezcla asfáltica, pero no cumple con el porcentaje de asfalto óptimo elegido que es de 4.08% ya que debería ser un VMA de 12.20% y el valor estipulado es mayor, de esta manera no cumple con los criterios de diseño para mezcla asfáltica.

Por otro lado, mediante la tabla 31 en donde se presentan los valores de los vacíos en el agregado mineral VMA para una granulometría densa mediante las tablas de la SCT (Secretaría de Comunicación y Transporte) el cual presenta los requisitos de calidad para el país de México en una mezcla asfáltica, se evidencia que para un tamaño nominal de 19 mm o $\frac{3}{4}$ " existe un porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica de diseño los cuales son: 3%, 4%, 5%, y teniendo en cuenta que el valor obtenido para los vacíos de la mezcla es de 3.35% esto indica que el porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral VMA es de 12%; por lo tanto, para un porcentaje de asfalto 4.08 % requiere un VMA de 12.20 %, así, cumplimiento este valor con los requisitos de calidad para una granulometría densa por el método Marshall.

Gráfica 25. VMA vs % de asfalto en pastillas con modificación No.3



Fuente: Propia

Con respecto a cada uno de los resultados presentados existe un porcentaje de asfalto de **4.08%** como el óptimo el cual hace cumplir los valores de las 6 gráficas.

En la tabla 37 se puede evidenciar un resumen de los resultados obtenidos de las pastillas testigo y las pastillas con modificación No.3 para su debido análisis. Se puede evidenciar que el contenido óptimo de asfalto disminuyó un 0.12% en comparación con las pastillas testigo; la estabilidad aumento de 7700 N valor de las pastillas testigo a 10200 N, es decir un 32.47% valor de las modificadas No. 3, lo que quiere indicar que hay una mayor resistencia a la deformación de la mezcla en las pastillas con modificación No.3 en comparación a las pastillas testigo. El flujo incremento 0.65 mm es decir un 19.41% de las modificadas No. 3 con respecto a las pastillas testigo, lo que significa que hay mayor deformación bajo carga en las pastillas con modificación No.3; el peso unitario se vio aumentado un 3.01% en las pastillas con modificación No.3 debido a la adición de las colillas de cigarrillo ya que al mismo tiempo aumentó la cantidad de cal y agua.

En el análisis de los vacíos se vio un aumento a comparación con las pastillas testigo; quiere decir, que las pastillas con modificación No.3 tienen mayores bolsas de aire que se encuentran entre las partículas del agregado revestidas de asfalto. De igual manera, este aumento se puede justificar debido a que menor contenido de asfalto mayor porcentaje de vacíos; el VFA tuvo una disminución del 2% en las pastillas modificadas No. 3, lo que quiere decir que en las pastillas con modificación No.3 hay menos vacíos llenos de asfalto, comparado con las pastillas testigo; para el VMA se mantuvo igual el porcentaje lo que corresponde que hay igual de vacíos en el agregado mineral.

Tabla 37. Tabla resumen de resultados del contenido óptimo de asfalto.

Pastillas	% de asfalto	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Peso unitario(kg/m ³)	Vacíos %	VFA %	VMA %
TESTIGO	4.2	7700	3.35	2058	3.20	74	12.20
MODIFICACION 3 3 g de colillas, 6.66 g de cal y 13.33 ml de agua	4.08	10200	4.0	2120	3.35	72	12.20

Fuente: Propia

En la siguiente tabla 38 se puede evidenciar un resumen de los resultados obtenidos de las pastillas testigo, las pastillas con modificación No.1, modificación No.2 y modificación No.3 para su debido análisis.

Se puede observar que el contenido óptimo de asfalto disminuyó 0.12% en las pastillas modificadas No. 3 en comparación a las pastillas con modificación No.2 y para las pastillas testigo aumentó 0.14% con respecto a las pastillas modificadas No.1; la estabilidad incremento de 9700 N valor de las modificadas No.2 a 10200 N para las modificadas No. 3; por otro lado, aumento de 7700 N el valor de las pastillas testigo a 10200 N el valor de las modificadas No. 3, y tiene el mismo valor de estabilidad de las pastillas con modificación No.1, lo que quiere decir que hay mayor resistencia a la deformación de la mezcla en las pastillas con modificación No.3 en comparación con las pastillas con modificación No. 2 y con las pastillas testigo, en relación a las pastillas con modificación No.1 la resistencia a la deformación es la misma. El flujo incremento 0.05 mm de las modificadas No. 3 con respecto a las modificadas No. 2, lo que significa que hay mayor deformación bajo carga en las pastillas con modificación No.3; además también existe un incremento comparando los valores con las pastillas con modificación No.1 y las pastillas testigo; el peso unitario se vio elevado en las pastillas con modificación No.2 este aumento se puede justificar debido a una mayor adición de material fino y una disminución de material grueso al momento de fabricar y compactar la pastilla no hubo una homogenización de la mezcla antes de ser compactada.

Se logró percatar que en la realización y fabricación de las pastillas con modificación No.2 hubo una alteración al momento de mezclar los materiales pétreos y compactarlos, debido a que por error humano en la cuantía de los materiales estas tuvieron mayor agregado fino y menor contenido de agregado grueso, así alterando la homogeneidad de las pastillas y teniendo como consecuencia el aumento del peso volumétrico, reducción de los vacíos por el aumento del material fino, pero extensión de vacíos llenos de asfalto por falta de agregado grueso.

En el análisis de los vacíos se presentó un incremento de 0.69 % de las pastillas modificadas No. 3 respecto a las modificadas No. 2, y se vio disminuido por 1.65 % entre las pastillas modificadas No.1 frente a las modificadas No. 3; por otro lado, se analiza

que las pastillas con modificación No.3 tienen mayores bolsas de aire que se encuentran entre las partículas del agregado revestidas de asfalto en comparación con las pastillas con modificación No.2 y pastillas testigo; y menor cantidad de bolsas de aire en comparación con las pastillas con modificación No.1. De igual manera, esta disminución se puede justificar debido a que, a mayor contenido de asfalto menor porcentaje de vacíos; el VFA tuvo una disminución del 5% en las pastillas modificadas No. 3 con respecto a las modificadas No. 2, lo que quiere decir que en las pastillas con modificación No.3 hay menos vacíos llenos de asfalto, lo que da a interpretar, que hay menos contenido de asfalto comparado con las pastillas con modificación No.2 y con las pastillas testigo; para el VMA se vio aumentado el porcentaje en un 1.8% entre las pastillas modificadas No.1 y las modificadas No.3; de igual manera, este aumento se vio reflejado entre las pastillas testigo y las modificadas No. 2, lo que corresponde que en las pastillas hay más vacíos en el agregado mineral, a diferencia de las modificadas No.2.

Tabla 38. Tabla resumen de resultados del contenido óptimo de asfalto.

Pastillas	% de asfalto	Estabilidad (N)	Flujo (mm)	Peso unitario(kg/m ³)	Vacíos %	VFA %	VMA %
TESTIGO	4.2	7700	3.35	2058	3.20	74	12.20
MODIFICACION 1 3 g de colillas, 3.33 g de cal y 6.66 ml de agua	4.06	10200	3.50	2130	5.0	70	14
MODIFICACION 2 3 g de colillas, 5.0 g de cal y 10.0 ml de agua	4.2	9700	3.95	2196	2.66	77	11.80
MODIFICACION 3 3 g de colillas, 6.66 g de cal y 13.33 ml de agua	4.08	10200	4.0	2120	3.35	72	12.20

Fuente: Propia

8. CONCLUSIONES

Se caracterizó cada uno de los materiales pétreos para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente, los cuales fueron sometidos a diferentes ensayos en laboratorio con el fin de determinar cada una de sus propiedades. Se encontraron resultados de manera satisfactoria debido a que se analizaron mediante criterios de diseño para materiales pétreos usados en mezclas asfálticas densas en caliente, para un tráfico con un número de ejes equivalentes iguales a un millón y en los materiales de grava triturada, sello triturado, arena triturada y arena volcánica, cumpliendo con la normatividad para materiales.

La realización de los cálculos correspondientes al método Marshall, inicia con la propuesta granulométrica, seguido del cálculo y la determinación del contenido mínimo de asfalto por dos métodos y el cálculo de las cantidades de los materiales pétreos por espécimen. Para el diseño se tuvo en cuenta la metodología Marshall logrando un diseño de mezcla asfáltica apropiado y preciso, obteniendo una diversidad de tablas con múltiples datos, los cuales cumplen todos los parámetros que requiere la metodología.

De manera continua, se elaboró una mezcla asfáltica densa en caliente por el método Marshall, cumpliendo con todos los parámetros estipulados por este método, se realizó la mezcla con un mezclador automático, la compactación se logró con el martillo Marshall y, por último se ensayó cada pastilla con la prensa Marshall. Todos los datos obtenidos en el laboratorio se registraron en una tabla Marshall para así poder determinar el contenido óptimo de asfalto. En la fabricación de la serie de pastillas con modificación No.2 (3.33 de colillas) se tuvo un error humano en la distribución de los materiales, lo que alteró la homogeneidad de la pastilla afectando el peso volumétrico.

Se determinó el contenido óptimo de asfalto para la adición de 3 g de colillas de cigarrillo, cubiertas por diversas cantidades de cal 3.33, 5 y 6.66 g disuelta en 6.66, 10 y 13.33 ml de agua respectivamente; estos valores se resumen en las gráficas las cuales representan: estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos, peso unitario, VMA y VFA, para cada variación de material como lo son: las colillas de cigarrillo, cal y agua. Se encontró que para los especímenes modificados No. 1 el contenido óptimo fue de 4.06%, para las modificadas No.2 de 4.2% y modificadas No.3 de 4.08%.

Se comprobó que las colillas de cigarrillo mejoran las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente, debido a que al momento de realizar las comparaciones entre los resultados de cada una de las pastillas modificadas con respecto a las pastillas testigo, se evidencia que con una menor cantidad de asfalto y con la adición de cantidades de colillas de cigarrillo, cal y agua, cada uno de los valores expresan mejoras; teniendo como finalidad la incorporación de un material no reutilizable

que incrementa el desempeño de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica densa en caliente.

La evaluación de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica con modificación en comparación con las características de la mezcla testigo, presenta una diversidad de valores. Inicialmente las pastillas con modificación No.1 tuvieron valores satisfactorios en comparación a las pastillas testigo, mejorando la estabilidad, obteniendo un mayor flujo, cumpliendo con los requisitos de calidad y teniendo unos vacíos VFA y VMA correctos con los criterios de diseño, lo anterior con un porcentaje menor de asfalto. Por otro lado, en las pastillas con modificación No.3 también se obtuvo mejores resultados en comparación a las pastillas testigo y con un porcentaje de asfalto inferior; en comparación, entre las modificadas No.1 que obtuvieron un porcentaje de asfalto menor que las modificadas No.3, los valores en general no son muy distantes y comprenden iguales propiedades.

Para finalizar, la obtención de mezclas asfálticas con asfaltos óptimos menores a los diseños convencionales beneficia económicamente el producto e impacta positivamente el medio ambiente al tener menos consumos de asfalto y la reducción de residuos sólidos a disponer.

9. RECOMENDACIONES

La investigación realizada contribuye a estudios posteriores del material utilizado (colillas de cigarrillo) como fuente principal para la creación de un pavimento modificado, debido a que el material es escasamente aprovechable se debe seguir buscando alternativas para su uso en cualquier campo de la construcción, con el fin de mitigar la contaminación por la descomposición de los materiales, además de contribuir al desarrollo de la reutilización de desechos no aprovechables y mitigar a gran escala la contaminación que estos generan en el ambiente. Por lo tanto, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Para el secado de las colillas de cigarrillo evitar hacerlo en un horno de laboratorio debido a los olores que estas comienzan a liberar ya que son bastante fuertes.
- Para la manipulación de las colillas de cigarrillo utilizar siempre guantes quirúrgicos, no manipularlas sin estos debido a que son utilizadas después de ser desechadas y estas almacenan bacterias.
- Quitar el papel que cubre las colillas de cigarrillo con el fin de que estas absorban directamente la cal hidratada, además de que el papel da un peso agregado a las colillas por mínimo que sea.
- Secar las colillas de cigarrillo al sol mínimo por dos horas con el fin de eliminar cualquier humedad que se pueda encontrar en ellas.
- Utilizar cal apagada (hidratada) debido a que en este estado su manipulación es segura y no reacciona de manera fuerte como la cal sin apagar.
- Al momento de adicionar las colillas de cigarrillo a la mezcla asfáltica, hacerlo cuando los materiales pétreos ya están recubiertos de asfalto puesto que las colillas de cigarrillo están cubiertas ligeramente de cal y si no se hace de esta manera puede repeler el pétreo con el asfalto.
- Para la elaboración de cada una de las pastillas se debe tener en cuenta la cantidad de agregado fino como grueso que deben poseer, así como la debida distribución de los materiales, esto con el fin de evitar errores humanos por cuestiones de falta de agregado o mayor cantidad de este, puesto que a la hora de la compactación de las pastillas estas pueden desmoronarse y crear alteraciones en los resultados.

10. BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN CANCER SOCIETY. Harmful Chemicals in tobacco Products. Disponible en internet: <https://www.cancer.org/cancer/cancer-causes/tobacco-and-cancer/carcinogens-found-in-tobacco-products.html>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Método de prueba estándar para densidad de masa (peso unitario). ASTM C 29/C 29 M-97. Estados Unidos de América, 2008-2009. p.1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso ASTM C 127 - 01. Estados Unidos de América. p.1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino ASTM C 128 - 01. Estados Unidos de América. p.1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación del agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles ASTM C 131 - 03. Estados Unidos de América. p.1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Método de prueba estándar para análisis de tamiz de agregados finos y gruesos ASTM C 136 - 01. Estados Unidos de América. p.1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Muestreo de agregados. ASTM D 75. Estados Unidos de América, p.1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Método de prueba estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregados finos ASTM D 2419 - 09. Estados Unidos de América. p.1.

ANCADE. Cal hidratada Un aditivo probado para la durabilidad de los pavimentos asfálticos. En: EULA (European Lime Association). p.1-4.

ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES Y PAVIMENTADORES ASFÁLTICOS EN COLOMBIA. Cartilla del pavimento asfáltico. La mezcla asfáltica. Bogotá. Editado por ASOPAC, 2004. 20 P.

ASPHALT INSTITUTO. Principios de Construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente. Serie de manuales No. 22 (MS-22). p.36.

CONSTRUMATICA. Definición de cal. Arquitectura, ingeniería y construcción. Portal, buscador y comunidad. Disponible también en: <https://www.construmatica.com/construpedia/Cal>.

CMT CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES. Calidad de mezclas asfálticas para carreteras. N-CMT-4-05-003/02. Estados Unidos mexicanos, p.6.

DECRETO 1713.MINISTRO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Diario Oficial No. 44.893, de 07 de agosto de 2002. p.12.

ELLI SLAUGHTER, Richard M Gersberg, et al. Toxicity of cigarette butts, and their chemical components, to marine and freshwater fish En: Press Release, 2011, vol. 20, p.25.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Análisis volumétrico de mezcla asfáltica compactada en caliente I.N.V. E – 799 - 07. Colombia. p.2.

JONES Janis, Chief Executive Officer. Ocean Conservancy International Coastal Cleanup (ICC 2017 Report).

MAHDI ABTAHI, Sayyed Mohammad Sheikhzadeh y Sayyed Mahdi Hejazi. Fibre reinforced asphalt concrete A review. En: ELSEVIER Construction and Building Materials. Diciembre, 2009. vol.24, p.871-877.

MOHAJERANI Dr. Abbas. Physico mechanical properties of asphalt concrete incorporated with encapsulated cigarette butts. En: ELSEVIER Construction and Building Materials. Julio, 2017. vol.153, p.69-80.

MONZONIS, José Carlos Marco y González Juan Andrés. Estudio para la minimización del residuo de colillas de tabaco y su posible reutilización. Trabajo de grado. Grandia. Universidad Politécnica De Valencia Escuela Superior De Gandia.2011. p.80.

PUTMAN Bradley J. Y Serji N. Amirkhanian. Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures. En: Elsevier Resources, Conservation and Recycling. Febrero, 2004. vol.42, p.265-274.

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTE. Aspectos de diseño volumétrico de mezclas asfálticas. ISO 9001:2000. Sanfandila, Oro: 2004. p.6.

11. ANEXOS

ANEXO A. Estado del arte.

(Ver CD “Anexos” apartado Anexo A)

ANEXO B. Resultados de laboratorio.

(Ver CD “Anexos” apartado Anexo B)

ANEXO C. Registro fotográfico.

(Ver CD “Anexos” apartado Anexo C)