

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



CENTRO UNIVERSITARIO UAEM VALLE DE MÉXICO

**DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA DENSA 3/4"
TEMPLADA POR SURFACTANTES PARA SU PROCESO DE
FABRICACIÓN.**

TESIS

Para obtener el Título de

INGENIERO INDUSTRIAL

Presenta

C. Hector Manuel Cervantes Barrios

Asesor: Dr. en Ing. José Guadalupe Miranda Hernández



Atizapán de Zaragoza, Edo. de Méx. Marzo

AGRADECIMIENTOS.

Le doy gracias a mis padres por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo, por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

A mis hermanos por ser parte importante de mi vida y representar la unidad familiar por llenar mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado y así poder servir de ejemplo para su desarrollo profesional.

Gracias Ingeniero Carlos Alan Portillo Aguilar por todo el apoyo y facilidades que me fueron otorgadas dentro de la empresa Capirsa. Por darme la oportunidad de aprender cosas nuevas y crecer profesionalmente.

Gracias Dr. José Guadalupe Miranda Hernandez por haberme brindado la oportunidad de desarrollar esta tesis profesional, le agradezco la confianza, apoyo y dedicación de tiempo a mis profesores de mi apreciada Universidad Autónoma del Estado de México en el centro universitario Valle de México, por haber compartido conmigo sus conocimientos y sobre todo su amistad.

Le agradezco a dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el diseño y elaboración de una mezcla asfáltica templada para su proceso de fabricación. en esta investigación se estudian los cambios entre las mezclas asfálticas convencionales y la propuesta asfáltica templada con la finalidad de estudiar su comportamiento y de esta manera establecer el proceso de fabricación.

En este sentido las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir cargas debidas al tráfico y sean soportadas por ésta.

Por lo anterior, de acuerdo con los estudios comparativos entre la mezcla asfáltica propuesta y la convencional los resultados encontrados dicen que el agregado de aditivos surfactantes en las mezclas asfálticas templadas densas 3/4" con asfalto AC-20 y AC-20 Modificado Tipo I, mantiene los parámetros de calidad en la evaluación de vacíos de aire (%), vacíos en el agregado mineral (%), estabilidad (Kg), flujo (mm) y peso volumétrico (kg/m^3) respecto a las mezclas sin aditivos en caliente, pero reduciendo la temperatura durante el proceso de mezclado de 160°C a 130°C que resuelven problemas de trabajabilidad de los materiales y compactación.

ABSTRACT

In the present work the design and elaboration of a temperate asphalt mixture for its manufacturing process is shown. In this research the changes between conventional asphalt mixtures and the temperate asphalt proposal are studied in order to study their behavior and thus establish the manufacturing process.

In this sense, asphalt mixtures are used in the construction of road surfaces, either in rolling layers or in lower layers and their function is to provide a comfortable, safe bearing surface for the users of the communication routes, facilitating the circulation of vehicles, apart from transmitting loads due to traffic and being supported by it.

Therefore, according to the comparative studies between the proposed asphalt mixture and the conventional one, the results show that the aggregate of surfactant additives in the 3/4 "dense asphalt mixtures with asphalt AC-20 and Modified Type I AC-20 , maintains the quality parameters in the evaluation of air voids (%), voids in the mineral aggregate (%), stability (Kg), flow (mm) and volumetric weight (kg / m³) compared to mixtures without additives in hot, but reducing the temperature during the mixing process from 160°C to 130°C that solve problems of workability of materials and compaction.

ÍNDICE.

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1	
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Justificación.....	4
1.3 Hipótesis.....	5
1.4 Objetivo general.....	5
1.5 Objetivos específicos.....	5
CAPÍTULO 2	
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes y estado de arte.....	8
El concepto de mezcla templada surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla asfáltica que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas asfálticas en caliente.	8
2.2. Tipos de mezclas asfálticas.....	11
2.2.1 Mezcla en caliente.....	11
2.2.2 Mezcla templada.....	11
2.3 Clasificación de mezclas asfálticas por su granulometría.....	12
2.3.1 Granulometría densa.....	13
2.4. Tipos de asfalto.....	13
2.4.1 Asfalto clasificación AC.....	14
2.4.2 Asfalto clasificación AC Modificado.....	16
2.5 Propiedades del asfalto.....	18
2.5.1 Viscosidad.....	

2.5.2	Punto de Inflamación.....	19
2.5.3	Punto de reblandecimiento.....	19
2.5.4	Penetración	19
2.5.5	Densidad	20
2.5.6	Envejecimiento	20
2.5.7	Adhesión y cohesión	20
2.6.	Tipos de agregado pétreo	21
2.6.1	Piedra triturada.....	21
2.6.2	Grava.....	22
2.6.3	Arena.....	22
2.6.4	Limos y Arcillas	22
2.7	Propiedades del agregado	23
2.7.1	Forma y angulosidad.....	23
2.7.2	Resistencia al desgaste.....	23
2.7.3	Resistencia al desprendimiento.....	24
2.8.	Tipos de aditivos para asfalto y sus propiedades.....	24
2.8.1	Aditivos basados en surfactantes.....	24
2.8.2	Aditivos empleados a los asfaltos	25
2.8.3	Rediset WMX-8017A (Akzo Nobel)	25
2.8.4	Surfathern (Surfax).....	26

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA..... 28

3.1. Preparación de las muestras..... 29

3.2. Pruebas de calidad para asfalto. 33

3.2.1	Prueba: Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos	33
3.2.2	Prueba: Punto de inflamación Cleveland en cementos asfálticos	37
3.2.3	Prueba: Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos.....	43
3.2.4	Prueba: Recuperación Elástica por Torsión en Cementos Asfálticos Modificados	49
3.2.5	Prueba: Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos	54
3.3	Pruebas de calidad para agregado pétreo	60
3.3.1	Prueba: Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.....	60
3.3.2	Prueba: Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	64
3.3.3	Prueba: Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.....	70
3.3.4	Prueba: Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	75
3.3.5	Prueba: Azul de Metileno de Materiales Pétreos en Mezclas Asfálticas	84
3.3.6	Prueba: Método de prueba para determinar la resistencia del agregado pétreo grueso a la degradación mediante el equipo Micro-Deval.....	88
3.4	Elaboración de especímenes	93
3.4.1.	Prueba: Método Marshall para mezclas asfálticas	93
3.5	Pruebas de calidad para mezcla asfáltica.	100
3.5.1	Prueba: Peso volumétrico compactado	100

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.	Resultados de pruebas para asfalto	109
4.1.1.	Resultados Viscosidad Rotacional Brookfield	109

4.1.2. Resultados Punto de inflamación	111
4.1.3. Resultados Prueba de penetración.	
4.1.4. Resultados Recuperación elástica por torsión.	115
4.1.5. Resultados Punto de reblandecimiento.	116
4.2. Resultados de pruebas de calidad para agregados pétreos.	118
4.3. Resultados diseño de granulometría para mezcla densa 3/4"	119
Para esto se tomarán los	119
4.4 Resultados pruebas de calidad para mezcla asfáltica.....	123
4.4.1 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 (MAD).....	123
4.4.2 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 con rediset wmx-8017a (MAD-AR- Templada)	126
4.4.3 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 con surfatherm (MAD-AS-Templada)	129
4.4.4 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 Modificado Tipo I (MADM-Tipo-I)	132
4.4.5 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 Modificado Tipo I con rediset wmx- 8017a (MADM-Tipo-I-AR-Templada)	135
4.4.6 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 Modificado Tipo I con surfatherm (MADM-Tipo-I-AS-Templada).....	138

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES..... 141

5.1 Conclusiones.....	142
5.2 Referencias	143
5.2 Anexos	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE FIGURAS.

Figura 1. Mezcla Asfáltica (Producto terminado).....	9
Figura 2. Puesta y tendido de mezcla asfáltica.....	10
Figura 3. Escala de temperatura de mezclas asfálticas.....	12
Figura 4. Clasificación de regiones geográficas del uso del asfalto.....	14
Figura 5. Trituración de piedra.....	21
Figura 6. Grava, arena y limos o arcillas de la trituración final.....	22
Figura 7. Cadena surfactante antes y después de agregar al asfalto	24
Figura 8. Material asfáltico a ensayar.....	29
Figura 9. Registro de peso (Tara).....	29
Figura 10. Registro de contenido de asfalto por muestra.....	30
Figura 11. Calculo de aditivo para muestras con Rediset WMX-8017A.....	30
Figura 12. Calculo de aditivo para muestras con Surfatherm.....	31
Figura 13. Parrilla eléctrica para preparación del asfalto	31
Figura 14. Agitador mecánico para mezclado.....	32
Figura 15. Viscosímetro digital Brookfield.....	33
Figura 16. Controlador de temperatura para cámara térmica.....	34
Figura 17. Capsulas con el contenido de asfalto.....	34
Figura 18. Cámara térmica para capsulas con asfalto.....	35
Figura 19. Viscosímetro Brookfield ajustado.....	35
Figura 20. Figura 20.- Parrilla eléctrica para la aplicación de calor.....	37
Figura 21. Fijación del termómetro al soporte.....	38
Figura 22. Copa Cleveland con asfalto.....	39

Figura 23. Aplicador de flama.....	39
Figura 24. Aplicación de flama sobre copa Cleveland.....	40
Figura 25. Punto de inflamación alcanzado.....	41
Figura 26. Punto de ignición alcanzado.....	41
Figura 27. Penetrómetro para asfaltos.....	45
Figura 28. Aguja para prueba de penetración.....	46
Figura 29. Capsulas de aluminio para ensayar el asfalto.....	46
Figura 30. Introducción de muestras al baño maría.....	47
Figura 31. Nivelación de penetrómetro.....	}
Figura 32. Ajuste de muestra en el penetrómetro.....	48
Figura 33. Ajuste de lectura del penetrómetro.....	49
Figura 34. Aparato de torsión.....	51
Figura 35. Partes del aparato de torsión.....	52
Figura 36. Ajuste del cilindro de ensaye.....	52
Figura 37. Capsula de asfalto fijado en el cilindro.....	53
Figura 38. Baño maría de la muestra de ensaye.....	53
Figura 39. Ajuste del cilindro.....	54
Figura 40. Toma de lectura de la semicorona graduada.....	54
Figura 41. Montaje del sistema de soporte.....	56
Figura 42. Anillos que contendrán el asfalto.....	57
Figura 43. Ajuste del soporte para ensaye.....	58
Figura 44.- Vaso de precipitado con la muestra de asfalto.....	58
Figura 45. Guía para centrar la esfera.....	59

Figura 46. Muestra puesta en parrilla.....	59
Figura 47. Transición del punto de reblandecimiento alcanzado.....	60
Figura 48. Calibrador de espesores.....	67
Figura 49. Calibrador de longitudes.....	67
Figura 50. Partículas pasando por el calibrador de longitudes.....	69
Figura 51. Partículas pasando por el calibrador de espesores.....	70
Figura 52. Máquina de los Ángeles.....	72
Figura 53. Introducción de materiales y esferas de abrasión.....	74
Figura 54. Componentes de botella con sifón y tubo irrigador.....	77
Figura 55. Pisón.....	78
Figura 56. Agitador mecánico.....	79
Figura 57. Habilitado del sifón.....	81
Figura 58. Probetas con solución de trabajo.....	82
Figura 59. Probetas en reposo del material previo a la agitación.....	82
Figura 60. Reposo de las muestras para toma de lecturas.....	83
Figura 61. Medición del nivel de los finos.....	84
Figura 62. Medición del nivel de arena.....	84
Figura 63. Formación del halo color azul alrededor de la gota.....	98
Figura 64. Máquina de abrasión Micro-Deval.....	91
Figura 65. Contenedor y carga abrasiva.....	91
Figura 66. Muestra a ensayar.....	92
Figura 67. Balines para realizar la prueba de ensaye.....	93
Figura 68. Ajuste de Maquina de Los Ángeles.....	93

Figura 69. Molde de compactación para la prueba Marshall.....	96
Figura 70. Equipo de compactación.....	96
Figura 71. Pisón de compactación Marshall.....	97
Figura 72. Prensa Marshall.....	97
Figura 73. Material pétreo calentado en el horno.....	99
Figura 74. Mezclado del asfalto con el material pétreo.....	100
Figura 75. Fijación de moldes precalentados.....	100
Figura 76. Colocación del material en los moldes.....	101
Figura 77. Compactación del material.....	101
Figura 78. Registro de alturas de los especímenes a ensayar.....	103
Figura 79. Registro de peso seco de los especímenes.....	103
Figura 80. Registro de peso sumergido de los especímenes.....	103
Figura 81. Registro de peso superficialmente seco de los especímenes.....	104
Figura 82. Especímenes finales.....	105
Figura 83. especímenes sumergidos en el baño maría.....	106
Figura 84. Fijación de especímenes en las mordazas.....	107
Figura 85. Ensaye de la prensa Marshall.....	107

ÍNDICE TABLAS.

Tabla 1. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezcla asfáltica de granulometría densa.....	13
Tabla 2. Clasificación de asfalto según su viscosidad dinámica a 60°.....	15
Tabla 3. Requisitos de calidad para cemento asfáltico clasificado por viscosidad dinámica a 60°.....	15

Tabla 4. Tabla 4. Requisitos de calidad para asfaltos AC Modificados.....	16
Tabla 5. Requisitos de calidad para asfaltos AC Modificados.....	18
Tabla 6. Características físicas de Rediset WMX-8017A.....	26
Tabla 7. Características físicas de Surfatherm.....	27
Tabla 8. Juegos de mallas para grava.....	62
Tabla 9. Juegos de mallas para arena con finos.....	62
Tabla 10. Juegos de mallas para material pétreo grueso.....	66
Tabla 11. Juego de mallas por tamaños.....	73
Tabla 12. Composición de la muestra de prueba y cargas abrasivas.....	75
Tabla 13. Preparación de una muestra de 16.0 mm o menor secada al horno.....	92
Tabla 14. Requisitos de calidad para mezclas de granulometría densa, mediante el método Marshall.....	107
Tabla 15. Vacíos en el agregado mineral (V.A.M) para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall.....	107
Tabla 16. Resultados agregados pétreos.....	118
Tabla 17. Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa.....	118
Tabla 18. Porcentajes de retenido de material pétreo grava y arena.....	119
Tabla 19. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezcla asfáltica densa	119
Tabla 20. Porcentajes para realizar especímenes muestra.....	121
Tabla 21. Composición de granulometría final.....	122
Tabla 22. Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas AC-20 (MAD).....	123

Tabla 23. Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas AC-20 (MAD-AR-Templada).....	126
Tabla 24. Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas (MAD-AS-Templada)	129
Tabla 25. Resultados de muestras ensayadas y valores permitidas (MADM-Tipo-I)	132
Tabla 26. Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas (MADM-Tipo-I-AR-Templada)	136
Tabla 27. Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas (MADM-Tipo-I-AS-Templada)	139

ÍNDICE GRAFICAS.

Grafica 1. Puntos de viscosidad Brookfield (AC-20).....	109
Grafica 2. Puntos de viscosidad Brookfield (AC-20 MODIFICADI TIPO I).....	110
Grafica 3. Punto de Inflamación (AC-20).....	111
Grafica 4. Punto de Inflamación (AC-20 MODIFICADO TIPO I).....	112
Grafica 5. Punto de penetración (AC-20).....	113
Grafica 6. Punto de penetración (AC-20 MODIFICADO TIPO I).....	114
Grafica 7. Recuperación elástica (AC-20 MODIFICADO TIPO I).....	115
Grafica 8. Punto de reblandecimiento (AC-20 MODIFICADO TIPO I).....	116
Grafica 9. Punto de reblandecimiento (AC-20 MODIFICADO TIPO I).....	117
Grafica 10. Porcentajes de grava.....	120
Grafica 11. Porcentajes de arena.....	120
Grafica 12. Composición de granulometría final.....	122
Grafica 13. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MAD).....	123

Grafica 14. Resultados de vacíos de agregado mineral (MAD).....	124
Grafica 15. Resultados de estabilidad (MAD)	124
Grafica 16. Resultados de flujo (MAD)	125
Grafica 17. Resultados de peso volumétrico (MAD)	125
Grafica 18. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MAD-AR-Templada)..	126
Grafica 19. Resultados de vacíos de agregado mineral (MAD-AR-Templada)	127
Grafica 20. Resultados de estabilidad (MAD-AR-Templada)	127
Grafica 21. Resultados de flujo (MAD-AR-Templada)	128
Grafica 22. Resultados de peso volumétrico (MAD-AR-Templada)	128
Grafica 23. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MAD-AS-Templada)..	129
Grafica 24. Resultados de vacíos de agregado mineral (MAD-AS-Templada).....	130
Grafica 25. Resultados de estabilidad (MAD-AS-Templada).....	130
Grafica 26. Resultados de flujo (MAD-AS-Templada).....	131
Grafica 27. Resultados de peso volumétrico (MAD-AS-Templada)	131
Grafica 28. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MADM-Tipo-I).....	132
Grafica 29. Resultados de vacíos de agregado mineral (MADM-Tipo-I).....	133
Grafica 30. Resultados de estabilidad (MADM-Tipo-I).....	133
Grafica 31. Resultados de flujo (MADM-Tipo-I).....	134
Grafica 32. Resultados de peso volumétrico (MADM-Tipo-I).....	134
Grafica 33. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MADM-Tipo-I-AR-Templada).....	135
Grafica 34. Resultados de vacíos de agregado mineral (MADM-Tipo-I-AR-Templada).....	136

Grafica 35. Resultados de estabilidad (MADM-Tipo-I-AR-Templada)	136
Grafica 36. Resultados de flujo (MADM-Tipo-I-AR-Templada)	137
Grafica 37. Resultados de peso volumétrico (MADM-Tipo-I-AR-Templada)	137
Grafica 38. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MADM-Tipo-I-AS-Templada)	138
Grafica 39. Resultados de vacíos de agregado mineral (MADM-Tipo-I-AS-Templada).....	139
Grafica 40. Resultados de estabilidad (MADM-Tipo-I-AS-Templada).....	139
Grafica 41. Resultados de flujo (MADM-Tipo-I-AS-Templada).....	140
Grafica 42. Resultados de peso volumétrico (MADM-Tipo-I-AS-Templada).....	140

Introducción.

En la actualidad, el asfalto se obtiene como un subproducto del petróleo. El asfalto que se emplea para pavimentar es el de destilación, que se consigue de los hidrocarburos que permanecen luego del refinamiento del petróleo procesado para producir gasolina y otros productos. De los residuos del petróleo, procesados a temperaturas de entre 204 y 316 grados, se obtiene también un tipo de asfalto empleado específicamente en la fabricación de materiales para tejados y productos afines. El asfalto, utilizando temperaturas de cerca de los 500 grados, es empleado también en la fabricación de materiales aislantes [1].

El asfalto es un material de vital importancia en la construcción civil. Su utilización tiene formas muy variadas, pero es usado principalmente como material para la construcción de carreteras.

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura y que se emplean en capas superficiales como material de resistencia estructural o mecánica. Lo que implica la necesidad del conocimiento de características de los materiales utilizados para tener un adecuado manejo y aplicación.

En el primer capítulo mostrará el planteamiento del problema del cual se le dará seguimiento en este proyecto de tesis.

El segundo capítulo se presentará los diferentes tipos de mezclas asfálticas clasificándolas por su temperatura y su granulometría. Sus principales características de cada una de ellas como su composición, temperaturas de producción y de compactación.

El tipo de asfaltos utilizados en la producción de mezclas asfálticas y sus propiedades mecánicas con las que se trabajan estos materiales como lo establece la normativa de la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes).

Los agregados pétreos utilizados en la producción de mezclas asfálticas y sus propiedades mecánicas con las que se trabajan estos materiales como lo establece la normativa de la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes). Tipos de aditivos a utilizar para la realización del diseño de esta manera conocer sus propiedades y las características que aportaran a la mezcla asfáltica templada.

El tercer capítulo realizara las pruebas de calidad de las normativas NIT-SCT (Normativa para la Infraestructura del Transporte), así como la (ASTM- American Society for Testing and Materials).

El cuarto capítulo explicará los resultados obtenidos de cada una de las pruebas de los materiales ensayados para determinar su comportamiento y posteriormente tomar una decisión del diseño final que cumpla con los parámetros y necesidades óptimas.

El quinto capítulo retomará los puntos anteriores dando una conclusión del resultado final obtenido.

CAPÍTULO 1.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Las mezclas asfálticas en caliente debido a sus condiciones de altas temperaturas de producción y menor tiempo de manipulación para su compactación generan pérdidas de producto terminado, si no se tiene un cuidado adecuado, por esta causa se busca diseñar y elaborar una mezcla asfáltica densa de 3/4" templada, a partir del agregado de aditivos surfactantes en diferentes proporciones en base a las normas NIT-SCT (Normativa para la Infraestructura del Transporte) y ASTM (American Society for Testing and Materials) y de esta manera obtener un mejor rendimiento de combustibles reduciendo la temperatura de producción de la mezcla asfáltica, pero sin disminuir las características funcionales una vez puesta en la obra.

La vinculación con el área de estudio de ingeniería industrial y civil para este proyecto es desarrollar un trabajo de diseño, evaluación y comparación del comportamiento de materiales nuevos y existentes para su aplicación a la industria de la construcción su función de estas actividades influye a través de los métodos la mejora de los productos. El diseño de la mezcla basada en el método a través de pruebas de ensayo que pretende satisfacer las necesidades al reducir la pérdida del producto en su manipulación.

1.2 Justificación

Las características y usos de los nuevos materiales mejoran el uso de los ya existentes, por lo que el asfalto se evaluará ante variables tales como el punto de inflamación, viscosidad rotacional, punto de reblandecimiento, recuperación elástica y penetración del asfalto.

El presente trabajo busca mostrar la comparación de características del diseño realizado de mezclas asfálticas templadas y las mezclas en caliente. Uno de los aspectos fundamentales de las mezclas templadas consiste en definir un diseño y una metodología de trabajo para que posteriormente pueda ser fabricada. Esto permitirá el desarrollo de una mezcla a menor temperatura que minimice los aspectos ambientales como la emisión de gases CO₂ y SO₂, producidos durante la fabricación y aplicación de las mezclas asfálticas convencionales que se utilizan, de esta forma

obtener un ahorro en los combustibles utilizados para la producción y el mejor manejo de los trabajadores en su compactación.

Menor pérdida de temperatura durante la fase de transporte, lo que permite que se tenga la posibilidad de realizar trayectos más largos o con tiempos más prolongados, de esta manera tener un producto de calidad con un servicio eficiente.

1.3 Hipótesis

El agregado de aditivos surfactantes en las mezclas asfálticas templadas densas 3/4" con asfalto AC-20 y AC-20 Modificado Tipo I, mantiene los parámetros de calidad en la evaluación de vacíos de aire (%), vacíos en el agregado mineral (%), estabilidad (Kg), flujo (mm) y peso volumétrico (kg/m^3) respecto a las mezclas sin aditivos en caliente pero reduciendo la temperatura durante el proceso de mezclado de 160°C a 130°C , que resuelven problemas de trabajabilidad de los materiales y compactación.

1.4 Objetivo general

Diseñar mezclas asfálticas densas 3/4" templadas que cumplan con los parámetros de calidad de los asfaltos, agregados pétreos y mezcla final de acuerdo con las normas NIT-SCT (Normativa para la Infraestructura del Transporte) y ASTM (American Society for Testing and Materials) con el agregado de los aditivos surfactantes Rediset WMX-8017A y Surfatherm a diferentes proporciones para encontrar el contenido óptimo de su comportamiento mecánico.

1.5 Objetivos específicos

- Evaluar asfalto AC-20
- Evaluar asfalto AC-20 con porcentajes de 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 de aditivo rediset wmx-8017a
- Evaluar asfalto AC-20, con porcentajes de 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 de aditivo surfatherm
- Evaluar asfalto AC-20 Modificado Tipo I

- Evaluar asfalto AC-20 Modificado Tipo I con porcentajes de 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 de aditivo rediset wmx-8017a
- Evaluar asfalto AC-20 Modificado Tipo I, con porcentajes de 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 de aditivo surfatherm
- Evaluar los agregados pétreos.
- Diseñar de granulometría para mezcla asfáltica densa $\frac{3}{4}$ " (MAD)
- Elaborar de especímenes con porcentajes de 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 de asfalto AC-20 (MAD), evaluar parámetros de vacíos de aire (%), vacíos en el agregado mineral (%), estabilidad (Kg), flujo (mm) y peso volumétrico (kg/m^3)
- Elaborar de especímenes de asfalto AC-20 con porcentajes de 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 de aditivo rediset wmx-8017a (MAD-AR-Templada), evaluar parámetros de vacíos de aire (%), vacíos en el agregado mineral (%), estabilidad (Kg), flujo (mm) y peso volumétrico (kg/m^3)
- Elaborar de especímenes de asfalto AC-20 con porcentajes de 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 de aditivo surfatherm (MAD-AS-Templada), evaluar parámetros de vacíos de aire (%), vacíos en el agregado mineral (%), estabilidad (Kg), flujo (mm) y peso volumétrico (kg/m^3)
- Elaborar de especímenes con porcentajes de 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 de asfalto AC-20 Modificado Tipo I (MADM-Tipo-I), evaluar parámetros de vacíos de aire (%), vacíos en el agregado mineral (%), estabilidad (Kg), flujo (mm) y peso volumétrico (kg/m^3)
- Elaborar de especímenes de asfalto AC-20 Modificado Tipo I con porcentajes de 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 de aditivo rediset wmx-8017a (MADM-Tipo-I-AR-Templada), evaluar parámetros de vacíos de aire (%), vacíos en el agregado mineral (%), estabilidad (Kg), flujo (mm) y peso volumétrico (kg/m^3)
- Elaborar de especímenes de asfalto AC-20 Modificado Tipo I con porcentajes de 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 de aditivo surfatherm (MADM-Tipo-I-AS-Templada), evaluar parámetros de vacíos de aire (%), vacíos en el agregado mineral (%), estabilidad (Kg), flujo (mm) y peso volumétrico (kg/m^3)

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes y estado de arte

El concepto de mezcla templada surgió en Europa, tras la necesidad de una mezcla asfáltica que ofreciera economía de energía y tuviera el mismo desempeño de las mezclas asfálticas en caliente.

El desarrollo de esta tecnología con enfoque en la reducción de temperatura de mezcla y compactación empezó en 1997, para cumplir con el protocolo de Kioto. La alternativa también facilita el trabajo de pavimentación en los países en los que el invierno es muy riguroso, una vez que la mezcla templada enfría más lentamente que la mezcla en caliente.

En 2002, especialistas de los Estados Unidos empezaron a investigar esta técnica, que rápidamente sería adoptada por ese país. En Brasil, se empezó a investigar la tecnología, adaptándola para las condiciones de trabajo locales [2].

Las mezclas templadas (denominadas en inglés como HWMA “Half- Warm Mix Asphalt” permiten reducir drásticamente la temperatura de fabricación y puesta en obra por debajo de 160 °C, ya que se fabrican y compactan generalmente entre 95 °C. y 130 °C.

Las mezclas templadas presentan importantes ventajas medio ambientales y constituirán en un futuro no muy lejano una alternativa eficaz para la fabricación y puesta en obra de las mezclas asfálticas. Aunque hace ya algunas décadas se recurrió a estas tecnologías templadas para corregir algunos problemas, no es hasta principios del siglo XXI cuando, probablemente impulsadas por la limitación de emisiones que exige el protocolo de Kioto, se desarrollan estas técnicas y se realizan los primeros tramos experimentales en España [3].

Las primeras aplicaciones de las mezclas templadas se realizaron con mezclas drenantes, si bien también se han realizado experiencias con mezclas discontinuas y con reciclados templados en los que es posible reciclar mezcla asfáltica hasta tasas del 100% en planta, lo que sin duda fue un avance importante para el aprovechamiento total de las mezclas asfálticas procedentes de firmes deteriorados.

Estas mezclas templadas han sido proyectadas, caracterizadas, fabricadas y puestas en obra adaptando los métodos y maquinaria existentes a las características específicas de este tipo de mezclas, ya que no existe ninguna normativa tanto a nivel nacional como internacional que recoja sus particularidades.

Con el objetivo de ayudar a los involucrados en obras de carreteras la construcción, la asistencia técnica y el control de calidad, para conseguir el máximo provecho de estas nuevas técnicas. Basándose en las experiencias realizadas hasta la fecha, los procedimientos de dosificación, las plantas de fabricación y equipos de puesta en obra y los campos de aplicación.

Las mezclas bituminosas templadas pueden fabricarse en centrales diseñadas específicamente para este tipo de mezclas, o en centrales de fabricación de mezclas en caliente. La central de fabricación debe disponer de un sistema de producción de calor en el tambor secador, que permita un calentamiento adecuado del material empleado en la fabricación, para alcanzar el rango de temperatura requerido.

Una planta convencional de mezclas en caliente está optimizada para un rango de temperaturas de trabajo elevado en sus sistemas de calentamiento y recuperación de polvo. Su empleo con temperaturas inferiores puede generar problemas, como desajustes en el quemador, contaminación de los materiales pétreos por mala calidad en la combustión [3].

¿Qué es una mezcla asfáltica?, Para producir una mezcla asfáltica se necesitan materiales que combinándolos cuidadosamente y de manera exacta para el uso que se haya determinado como son agregados pétreos, asfalto y aditivos en caso de usarlos.

La variación de temperatura, las proporciones de asfalto y material pétreo afectarán directamente en las propiedades físicas de la mezcla, por lo tanto, cambiará el rendimiento de la mezcla terminada como se aprecia en la figura 1.



Figura 1. Mezcla asfáltica (Producto terminado)

Las mezclas asfálticas se emplean en la construcción de firmes como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Puesta y tendido de mezcla asfáltica

ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores y su función es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, aparte de transmitir cargas debidas al tráfico y sean soportadas por ésta [4].

2.2. Tipos de mezclas asfálticas

Se clasifican en mezclas asfálticas en caliente fabricadas con asfaltos y agregados a temperaturas elevadas, y la puesta en obra se realiza a temperaturas superiores al ambiente. Las mezclas templadas cuya temperatura de fabricación y tendido disminuye por la adición de aditivos.

2.2.1 Mezcla en caliente

Una mezcla asfáltica en caliente es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo, en una planta mezcladora estacionaria, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla.

Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, con un rango de 160 °C a 190 °C, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos.

La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores al ambiente pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

2.2.2 Mezcla templada

La mezcla asfáltica templada, está constituida de asfaltos, agregados pétreos y aditivos su temperatura de producción va de un rango de 130 ° C a 150 ° C, estando por debajo de las convencionalmente empleadas, lo cual la hace más ecoeficiente como se muestra en la figura 3.

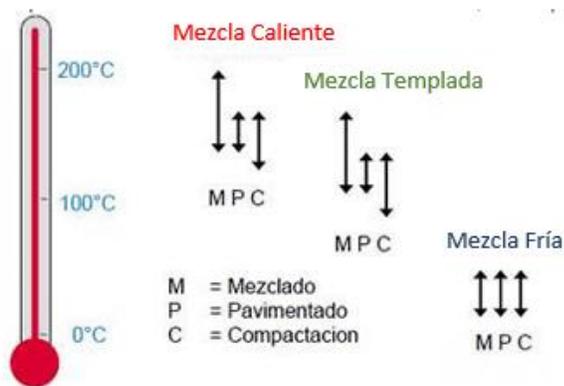


Figura 3. Escala de temperatura de mezclas asfálticas

Así mismo presenta una mejor adhesividad entre el asfalto y el agregado pétreo, después de ser tendida y compactada conforme al procedimiento constructivo, presenta una mejor fuerza de cohesión entre partículas.

Ofrece beneficios económicos y ambientales, sin minimizar la calidad del producto terminado, así como mejoras en las condiciones laborales del personal de obra, al ser posible iniciar su proceso de compactación entre 95°C a 130°C, generando disminución de la radiación térmica, además su facilidad de aplicación, por lo mencionado anteriormente el personal no inhala tantos gases producto de la combustión del asfalto a mayores temperaturas [5].

Las mezclas asfálticas templadas constituyen una evolución de las mezclas en frío y de las mezclas en caliente. Se trata de mezclas de gran calidad, y beneficia al medio ambiente con menos de emisiones de CO₂ y SO₂ durante el proceso de fabricación y posibilidad de reducir los trasportes para la puesta en obra.

2.3 Clasificación de mezclas asfálticas por su granulometría

Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo. Las mezclas asfálticas, según el procedimiento de mezclado, se clasificarán de la siguiente manera.

2.3.1 Granulometría densa

Es la mezcla en caliente de manera uniforme y homogénea elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 3/8" (9.5) milímetros y 1 1/2" (37.5) milímetros como se muestra la clasificación en la tabla 1 [6].

Que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula D. de la Norma N.CMT.4-04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes [7].

Tabla 1. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezcla asfáltica de granulometría densa

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (3/4)	12,5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37,5 (1 1/2)
Porcentaje que pasa						
50	2"	---	---	---	---	100
37,5	1 1/2"	---	---	---	100	90 - 100
25	1"	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	3/4"	---	100	90 - 100	79 - 90	62 - 79
12,5	1/2"	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9,5	3/8"	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
6,3	1/4"	70 - 81	56 - 69	44 - 57	36 - 46	30 - 39
4,75	N°4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 34
2	N°10	28 - 42	25 - 35	20 - 29	17 - 24	13 - 21
0,85	N°20	18 - 27	15 - 22	12 - 19	9 - 16	6 - 13
0,425	N°40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0,25	N°60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0,15	N°100	6 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0,075	N°200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

2.4. Tipos de asfalto

El asfalto es un material viscoso, de color oscuro que se utiliza en las mezclas asfálticas usado como aglomerante para la construcción de carreteras o autopistas está presente en el petróleo crudo el asfalto es una sustancia que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo.

En la actualidad, el asfalto se obtiene como un subproducto del petróleo que se consigue de los hidrocarburos que permanecen luego del refinamiento del petróleo procesado para producir gasolina y otros productos. De los residuos del petróleo, procesados a temperaturas de entre 204 y 316°C.

2.4.1 Asfalto clasificación AC

Los cementos asfálticos son los que se obtienen del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo, como se muestra en la figura 4, dependiendo de las regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60 °C (N.CMT.4.05.001/00).



Figura 4. Clasificación de regiones geográficas del uso del asfalto

Como se indica en la tabla 2. Donde se señalan los usos más comunes de cada uno de estos materiales según la zona que corresponde de acuerdo con la temperatura de dicha región o el uso que se empleara como por ejemplo emulsiones, riegos de impregnación y carpetas [8].

Tabla 2. Clasificación de asfalto según su viscosidad dinámica a 60°C

Clasificación	Viscosidad a 60°C Pa·s (P ^[1])	Usos más comunes
AC-5	50 ± 10 (500 ± 100)	<ul style="list-style-type: none"> En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1 En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.
AC-10	100 ± 20 (1 000 ± 200)	<ul style="list-style-type: none"> En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1
AC-20	200 ± 40 (2 000 ± 400)	<ul style="list-style-type: none"> En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2
AC-30	300 ± 60 (3 000 ± 600)	<ul style="list-style-type: none"> En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 4 En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zonas 3 y 4 En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos de impregnación.

[1] Poises

Los requisitos de calidad necesarios para el asfalto AC derivados por su viscosidad dinámica a 60 °C se muestran en la Tabla 3, donde se tienen las características a cumplir para cada uno de ellos y su clasificación.

Tabla 3. Requisitos de calidad para cemento asfáltico clasificado por viscosidad dinámica a 60°, N-CMT-4-05-001/06

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento asfáltico original:				
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s (P ^[1])	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1 000 ± 200)	200 ± 40 (2 000 ± 400)	300 ± 60 (3 000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad; %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento; °C	37 - 43	45 - 52	48 - 56	50 - 58

2.4.2 Asfalto clasificación AC Modificado

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación.

Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua [9].

Representado en la tabla 5, las características de cada uno de ellos y el tipo de modificador del que está compuesto.

**Tabla 4. Requisitos de calidad para asfaltos AC Modificados
N-CMT-4-04-002/06**

Características	Tipo de cemento asfáltico (Tipo de modificador)				
	AC-5 (Tipo I ó II)	AC-20 (Tipo I)	AC-20 (Tipo II)	AC-20 (Tipo III)	AC-20 (Hule molido)
Del cemento asfáltico modificado:					
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C; s, máximo	500	1000	1000	1000	--
Viscosidad rotacional Brookfield a 135°C; Pa s, máximo	2	4	3	4	--
Viscosidad rotacional Brookfield (tipo Haake) a 177°C; Pa s, máximo	--	--	--	--	7
Penetración:					
• A 25°C, 100 g, 5 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	80	40	40	30	30
• A 4°C, 200 g, 60 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	40	25	25	20	15
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	220	230	230	230	230
Punto de reblandecimiento; °C, mínimo	45	55	55	53	57
Separación, diferencia anillo y esfera; °C, máximo	3	3	3	4	5
Recuperación elástica por torsión a 25°C; %, mínimo	25	35	30	15	40
Resiliencia, a 25°C; %, mínimo	20	20	20	25	30

- Polímero tipo I.

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB), entre otras.

Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales [9].

- Polímero tipo II.

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- Polímero tipo III.

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo plastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- Hule molido de neumáticos

Es un modificador de asfaltos que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta, tratamientos superficiales.

El empleo de los modificadores está condicionado al análisis de las ventajas que se obtengan de ellos para mejorar el comportamiento mecánico y la duración de los trabajos de pavimentación en cada caso específico y de acuerdo con las condiciones climáticas, de tránsito, la rigidez de la estructura del pavimento, la disponibilidad de los materiales, el periodo de vida útil considerado en el diseño, la estrategia de mantenimiento y el costo de operación de los vehículos, entre otros.

Su uso depende de la evaluación económica de su aplicación, en comparación con otras opciones lo cual corresponde al proyectista la selección del tipo de modificador a emplear y su dosificación, para cumplir con los parámetros de comportamiento deseados.

2.5 Propiedades del asfalto

2.5.1 Viscosidad

La viscosidad es la relación entre la fuerza aplicada a un fluido y la velocidad con la que fluye. Por lo tanto, la viscosidad de un ligante es una de sus características esenciales desde el punto de vista de su comportamiento en el momento de su aplicación cuando su consistencia es suficientemente reducida. La viscosidad de los ligantes hidrocarbonatos depende de la temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una buena idea de cuál es su susceptibilidad térmica. Sólo para ciertas investigaciones se utilizan viscosímetros capilares para la obtención de la viscosidad cinemática absoluta del producto a una temperatura.

Si sometemos un fluido a la acción de una fuerza, se produce una deformación de dicho fluido. Pero esta deformación corresponde solamente a parte de la energía aplicada al fluido. El resto de la energía aplicada se transformará en energía calorífica, debido al frotamiento interno que se produce en el fluido. Cuando éste sea viscoso, esta energía empleada en vencer los frotamientos internos será grande.

2.5.2 Punto de Inflamación

Es la temperatura a la cual arden los vapores del asfalto al aproximar a la superficie del material una llama de prueba. Su determinación es interesante, puesto que cuando comprobemos que el punto de inflamación está 25 o 30 grados centígrados por encima de la temperatura a la que manejamos el asfalto para su utilización en la obra, procederemos a estas operaciones con notables precauciones. El punto de inflamación de un asfalto debe de estar alrededor de los 215 grados Celsius.

2.5.3 Punto de reblandecimiento

Para poner en obra un material asfáltico debe contar con la aptitud que presenta para variar su viscosidad en función de la temperatura. Es muy importante la susceptibilidad térmica debido a que se puede conocer la temperatura adecuada para que el producto asfáltico adquiera la viscosidad requerida para el uso que se le dará.

2.5.4 Penetración

Es una medida de la consistencia del producto asfáltico, que se determina midiendo en milímetros, la longitud de una aguja normalizada que entra en una muestra en unas condiciones especificadas de tiempo, temperatura y carga.

Esta propiedad, por sí sola, no nos permite identificar un asfalto, pero sí nos define si el producto que está sometido al ensayo es líquido, semisólido o sólido. La penetración de un producto asfáltico disminuye cuando la densidad de este aumenta.

2.5.5 Densidad

La densidad de los asfaltos que se utilizan en la construcción de pavimentos varía los valores más altos de densidad de un asfalto corresponden a los asfaltos procedentes de crudos con un alto contenido de hidrocarburos aromáticos.

La densidad puede darnos idea de las impurezas que contiene un producto y su medida nos sirve de control de la uniformidad de un suministro.

La densidad relativa de un ligante es la razón entre el peso de un determinado volumen de ligante y el peso de un volumen igual de agua a una determinada temperatura su conocimiento permite pasar de pesos a volúmenes o viceversa este valor se determina con un picnómetro.

2.5.6 Envejecimiento

El asfalto está compuesto por moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del aire oxidándose lo que les hace más duros y frágiles este envejecimiento oxidativo se produce de forma muy lenta cuando el asfalto está en el firme, aunque este proceso es más rápido cuando las temperaturas a las que se ve sometido son mayores.

Se debe tener en cuenta también que gran parte de este envejecimiento o endurecimiento oxidativo tiene lugar antes de que el asfalto esté compactado, durante el proceso de mezcla en el que el ligante está sometido a altas temperaturas y en forma de película fina sobre la superficie del ligante, lo que hace que el proceso sea más rápido, pudiéndose producir en este periodo otros tipos de envejecimiento, como la pérdida de los componentes más volátiles del asfalto, que se traduce en un endurecimiento del mismo.

2.5.7 Adhesión y cohesión

La adhesión es la manifestación principal de las fuerzas que actúan entre las moléculas de un ligante y de las superficies del sólido. Por su parte, la cohesión es la manifestación de las fuerzas que mantienen juntas las moléculas del ligante.

2.6. Tipos de agregado pétreo

Los materiales pétreos son aquellos que provienen de la roca, de piedras o rocas habitualmente se encuentran en forma de bloques, losetas o fragmentos de distintos tamaños.

- Naturales

localizados en yacimientos naturales, para utilizarlos sólo es necesario que sean seleccionados, refinados y clasificados por tamaños; comúnmente se hallan en yacimientos, canteras o graveras.

- Manufacturados

se localizan en macizos rocosos; para obtenerlos se emplean procedimientos de voladura con explosivos, posteriormente se limpian, trituran y clasifican como, por ejemplo: piedra caliza, granito, cuarcita y andesita basáltica.

2.6.1 Piedra triturada

La piedra triturada es el resultado del machaqueo mecánico de roca sólida para reducir su tamaño por medio de una trituradora y de esta manera poder ser utilizadas posteriormente de acuerdo con el tamaño de la partícula mostrado en la figura 5.



Figura 5. Trituración de piedra

Esa puede ser triturada a cualquier graduación deseada por medio de uso de varios tipos de máquinas trituradoras y cribas. El objetivo es obtener partículas cubicas, aunque algunos tipos de roca especialmente las sedimentarias se forman por estratos al quebrarse formas lajas largas las cuales hacen su uso cuestionable.

2.6.2 Grava

Es el producto por la desintegración de grandes rocas. Son partículas más grandes de las arenas punto retenido es de la malla #4 (4.75 mm) y pasa la malla 3”.

2.6.3 Arena

Material fino resultado de la desintegración de rocas o del triturado del agregado grueso esta se define como el material que pasa la malla #4 (4.75 mm) y se retiene en la malla #200 (0.075 mm).

2.6.4 Limos y Arcillas

Cualquier sedimento o depósito mineral y que consiste en un material muy fino, formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño pasa la malla #200 (0.075 mm) que se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados. Como se observa en la figura 6, los materiales pétreos antes mencionados de acuerdo con el tamaño de las partículas de los cuales se conformará la mezcla asfáltica terminada.



Figura 6. Grava, arena y limos o arcillas de la trituración final

2.7 Propiedades del agregado

2.7.1 Forma y angulosidad

La forma de las partículas del agregado grueso afecta fundamentalmente, al esqueleto mineral. Según su forma, las partículas pueden clasificarse en redondeadas, irregulares, angulares, lajeadas, alargadas.

Las lajeadas y alargadas, pueden romperse con facilidad durante la compactación o después bajo la acción del tráfico, modificando con ello la granulometría del agregado inicial.

Se deben imponer limitaciones en el contenido de partículas de mala forma. Aparte de la forma de las partículas del agregado grueso, se debe tener en cuenta su angulosidad, que influye junto a la textura superficial de las partículas, en la resistencia del esqueleto mineral, por su contribución al rozamiento interno.

2.7.2 Resistencia al desgaste

La resistencia mecánica del esqueleto mineral es un factor predominante en la evolución del comportamiento de una capa de firme después de su puesta en servicio. La evaluación de dicha resistencia se realiza mediante diversos ensayos de laboratorio, sin embargo, ninguno de ellos caracteriza el estado tensional del agregado en el conjunto del firme.

Se realizan una serie de ensayos que tienden a reproducir en laboratorio de manera más sencilla el comportamiento que luego tendrán los agregados en servicio, para ello se preparan las muestras con granulometrías próximas a las que van a ser puestas en obra, sometiéndolas a un desgaste que, de forma indirecta, proporciona información de la resistencia mecánica del material la prueba de Los Ángeles es un ejemplo de este tipo de ensayos.

2.7.3 Resistencia al desprendimiento

Los defectos de adhesión significan la quiebra de las fuerzas de unión entre el agregado y su cubierta de conglomerante asfáltico, lo que conduce a una separación física, una posible consecuencia de los defectos de adhesión, es el fallo mecánico por desgaste y desflecado de la superficie, pero el fallo mecánico no se produce inmediatamente después del fallo de adhesión, si el desprendimiento, aunque sea permanente, se produce a un nivel inferior de la construcción y el grado de entrecruzamiento físico de las partículas de agregado es suficiente para resistir el esfuerzo del tráfico.

Dado que el desprendimiento es un fenómeno asociado a la presencia de agua. Se deduce que los pavimentos densos, de bajo contenido en huecos, son prácticamente inmunes y que el comportamiento de los agregados pétreos en los ensayos de deslizamiento es bastante irrelevante en dicho uso.

2.8. Tipos de aditivos para asfalto y sus propiedades

2.8.1 Aditivos basados en surfactantes

Los surfactantes o agentes de superficie activa son especies químicas con una naturaleza o estructura polar - no polar, con tendencia a localizarse en la interfase formando una capa molecular adsorbida en la interfase que cambia el valor de la tensión superficial como se ve en la figura 7.

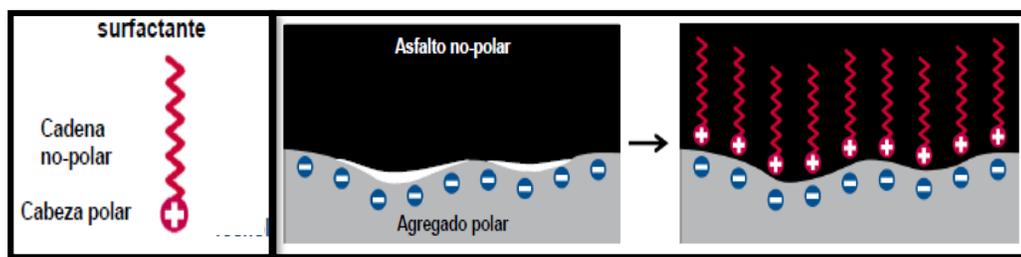


Figura 7. Cadena surfactante antes y después de agregar al asfalto

Estos productos mejoran la trabajabilidad de la mezcla, y la compactación, así como promotores de adhesión (agentes cohesivos). La cantidad añadida y la reducción de temperatura conseguida por estas tecnologías dependen del producto específico utilizado los aditivos generalmente se mezclan con el ligante antes de que éste sea introducido en el tambor de mezclado.

2.8.2 Aditivos empleados a los asfaltos

- **Ventajas**

Trabajabilidad debido a la reducción de tensión en la superficie

Más fácil de recubrir el agregado y más fácil de compactar

Mejor trabajabilidad permite la reducción en temperatura

Algunos incluyen aditivos antidesprendimiento

Esta tecnología se basa en la adición a la mezcla que mejoran la trabajabilidad del ligante debido a una combinación de efectos de disminución de la viscosidad tanto en las temperaturas de mezcla, como de compactación.

Durante el periodo de enfriamiento de la mezcla extendida los aditivos se solidifican en partículas microscópicas y uniformemente distribuidas que incrementan el recubrimiento de asfalto y el material pétreo contenido.

2.8.3 Rediset WMX-8017A (Akzo Nobel)

La industria de la carretera se está desarrollando actualmente junto con los avances en la tecnología, no solo por la economía sino también como resultado de la seguridad y la demanda ambiental.

Akzo Nobel ha estado trabajando en la industria del asfalto durante muchos años, proporcionando soluciones químicas a los problemas de pavimentación y desarrolló en respuesta a estas demandas.

La tecnología templada está disponible y se encontró que Rediset WMX-8017A ofrece una nueva solución donde la capacidad de mezcla en caliente se combina con propiedades de pavimento mejoradas mostrando sus características físicas del material en la tabla 6.

Tabla 6. Características físicas de Rediset WMX-8017^a

Aspecto a 25 °C	Apariencia: Pastillas marrón
Punto de ebullición: 80 – 95 °C	Densidad Suelto, g/cc: 0.55
Punto de inflamación: 238 °C	Densidad Suelto, lbs/gal: 4.6

- Método de empleo del aditivo

1 - 2% por peso de asfalto recomendado, el cual debe ser determinado por pruebas de diseño de mezclas en el laboratorio.

El producto es adecuado para todos los grados de asfalto, incluido los modificados con polímeros y el caucho de los neumáticos.

- Almacenaje y manejo

Rediset WMX-8017A se debe almacenar bajo cubierta, protegida contra lluvia y luz solar directa.

Es irritante para la piel y los ojos, por lo que se debe utilizar guantes y lentes de seguridad al manejar este producto. La presentación está disponible en saco de 55 lbs. (24.9 Kg).

2.8.4 Surfatherm (Surfax)

Surfatherm es un producto desarrollado en México, que permite la fabricación de mezclas asfálticas templadas. permitiendo mezclar y compactar a temperaturas inferiores a las recomendadas para un asfalto convencional.

Las características del material Surfatherm como se muestra en la tabla 7, Se puede adicionar al asfalto en tanques con agitación el asfalto aditivado se envía directamente a la producción de mezcla en caliente sin la necesidad de equipos adicionales o equipos de nuevas tecnologías.

Tabla 7. Características físicas de Surfatherm

Aspecto a 25 °C	Apariencia: Líquido amarillo claro
Punto de ebullición: 205 °C	Densidad Suelto, g/cm³: 0.94
Punto de inflamación: 174 °C	pH: 2 – 2.5 al 10% en agua

- Método de empleo del aditivo

Se dosifica regularmente entre 0.5 y 1.0 % respecto al peso de asfalto. Sin embargo, es recomendable realizar un estudio con el agregado particular para determinar la mejor dosificación en cuanto a costo – beneficio.

- Almacenaje y manejo

Surfatherm se debe mantener a la sombra, bajo techo y siempre en su envase, cerrado. Su presentación del producto es en bidón de 50 kg peso neto.

CAPÍTULO 3.

METODOLOGÍA

3.1. Preparación de las muestras

Se realizarán 10 muestras con asfalto AC-20, agregando distintas proporciones de aditivo rediset wmx-8017a y surfatherm respecto de la muestra original sin aditivo. De igual manera 10 muestras utilizando asfalto AC-20 Modificado Tipo I, de la siguiente manera:

a) Tomar cada muestra de asfalto AC-20 y AC-20 Modificado, utilizando botes de aluminio para contener el material como se observa en la imagen de la figura 8.



Figura 8. Material asfáltico a ensayar

b) Se pesará cada uno de los botes de aluminio a utilizar registrando su peso como la tara de cada uno de ellos, como se ve en la imagen de la figura 9.



Figura 9. Registro de peso (Tara)

c) Llenar de asfalto cada bote de aluminio que será utilizado y pesarlo cada una de las muestras restando el peso de la tara, para obtener el contenido total de material asfáltico tal como se muestra en la imagen de la figura 10.



Figura 10. Registro de contenido de asfalto por muestra

d) Colocar aditivo rediset wmx-8017a, a distintas proporciones de esta manera obtener las muestras a comparar y ver el comportamiento de cada una de ellas con ambos asfaltos a un punto medio que recomienda el fabricante 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.2%, 1.4% mostrado en la figura 11, con ayuda de los valores anteriormente registrados.



Figura 11. Calculo de aditivo para muestras con rediset wmx-8017a

e) De la misma manera se procede a colocar aditivo surfatherm en ambos asfaltos como en el primer caso representado en la figura 12, con las siguientes proporciones del 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.2%, 1.4%.

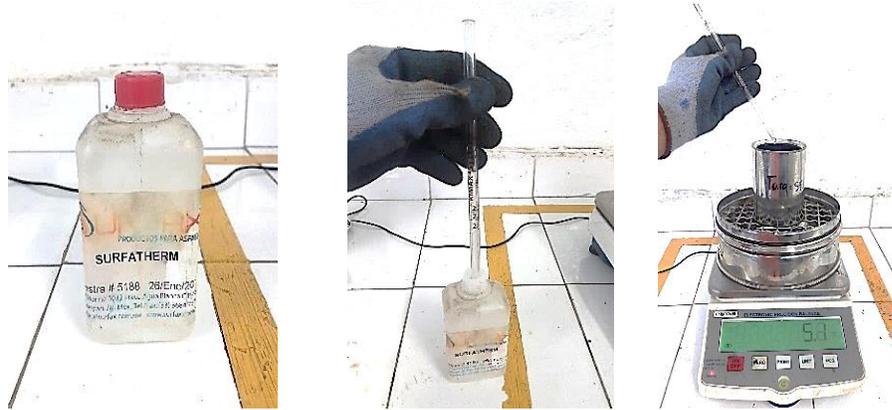


Figura 12. Calculo de aditivo para muestras con surfatherm

f) Se colocará cada muestra del asfalto contenida en los botes de aluminio en la parrilla controlando la temperatura entre 135°C. a 145°C. Para calentar el material y así facilitar su manejo como se muestra en la imagen de la figura 13.

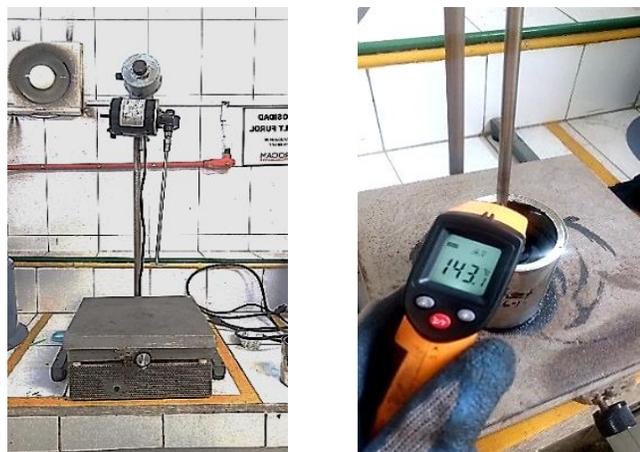


Figura 13. Parrilla eléctrica para preparación del asfalto

g) Se procederá a utilizar el agitador mecánico como se aprecia en la figura 14, y hacer uniforme la mezcla de asfalto con el aditivo, de esta manera poder ser utilizado en las pruebas posteriores.



Figura 14. Agitador mecánico para mezclado

h) Se incrementará gradualmente la velocidad del agitador mecánico con un tiempo de duración de 10 min. Por cada una de las muestras.

Al finalizar esto con cada una de ellas estarán listas para ser ensayadas por las pruebas de calidad para asfaltos correspondientes, las cuales se describirán en la siguiente metodología.

3.2. Pruebas de calidad para asfalto.

3.2.1 Prueba: Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, en un rango de 38 a 260°C, mediante la determinación de la resistencia que ofrece una muestra de prueba a la deformación. La prueba consiste en determinar el par de torsión que es necesario aplicar en un eje rotacional, en el seno de una muestra de prueba colocada dentro de un contenedor, bajo condiciones controladas de temperatura, para que gire a una cierta velocidad [10].

- Equipo.
- **Viscosímetro** Brookfield estándar.
- **Sistema Thermosel** formado por un contenedor y una cámara de prueba térmicos; un controlador de temperatura y un dispositivo graficador como se ve en la figura 15.



Figura 15. Viscosímetro digital Brookfield

- Preparación del equipo

Se fijan los controles para precalentar el equipo a la temperatura de prueba (135 °C) como se ve en la figura 16, se espera por aproximadamente 1.5 h o hasta que la temperatura de equilibrio se haya alcanzado en la cámara de prueba y el rotor.



Figura 16. Controlador de temperatura para cámara térmica

- Preparación de la muestra

Se evita el sobrecalentamiento de la muestra o su inflamación, se elige el volumen de la muestra de prueba entre de 8 y 10 ml como se ve en la figura 17, el cual se añadirá a las capsulas que contendrán el asfalto para realizar la prueba.

Se evita exceder el llenado del contenedor, ya que el resultado de la prueba es muy sensible a la cantidad de muestra que se utilice. El nivel superior de la muestra debe interceptar al brazo del rotor, aproximadamente 3.2 mm de la parte superior entre el cuerpo cónico del rotor.



Figura 17. Capsulas con el contenido de asfalto

- Procedimiento de la prueba

a) Una vez preparada la muestra, se coloca de nuevo la cámara de prueba en el contenedor térmico mostrado en la figura 18, teniendo el debido cuidado para que el material asfáltico no se derrame o manche la cámara al ser colocado.



Figura 18. Cámara térmica para capsulas con asfalto

b) Se ajusta el rotor introduciéndolo despacio y con cuidado hasta que esté sumergido a la profundidad indicada en la figura 19, entonces se mueve la cámara de prueba en un plano horizontal hasta que el rotor esté localizado aproximadamente en el centro de esta.



Figura 19. Viscosímetro Brookfield ajustado

c) Se deja reposar la muestra de prueba aproximadamente 15 min, para permitir que se equilibre su temperatura.

- Cálculos

Se reporta como resultado de esta prueba, en Pa·s, el promedio de las lecturas observadas en el viscosímetro para cada temperatura de prueba, indicando el número de rotor utilizado. En caso necesario, se harán las conversiones de unidades necesarias, de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

- Precauciones para evitar errores

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpia y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de prueba.
2. Verificar que el equipo esté calibrado de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
3. Mantener constante la velocidad del rotor durante la lectura de las mediciones.
4. Cuidar que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al hacer la prueba la muestra no se mezcle con agentes extraños y se altere el resultado. Se cuida de manera especial la limpieza del rotor. Después de cada determinación, el equipo se limpia utilizando una estopa impregnada con un disolvente apropiado.

3.2.2 Prueba: Punto de inflamación Cleveland en cementos asfálticos

La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en una copa abierta de Cleveland, en donde se incrementa paulatinamente su temperatura hasta lograr que al pasar una flama por la superficie de la muestra se produzcan en ella flamas instantáneas, la temperatura correspondiente se denomina punto de inflamación.

Si se continúa elevando la temperatura de la muestra se llega al punto en que se inicia la combustión del material, la temperatura correspondiente se denomina punto de ignición [11].

- Equipo
- **Copa abierta de Cleveland** De latón, bronce o acero inoxidable, con la forma y dimensiones indicadas en la figura 20.
- **Soporte para la copa abierta de Cleveland:** provisto de una placa de apoyo metálica y otra de asbesto.



Figura 20. Parrilla eléctrica para la aplicación de calor.

- **Termómetro de inmersión parcial** con bulbo de 25 mm de longitud, con rango de -6 a 400°C y aproximación de 2°C.

- Preparación de la muestra

De la muestra de cemento asfáltico, obtenida según se establece en el Manual M-MMP-4-05-001, Muestreo de Materiales Asfálticos, se toma una porción de volumen ligeramente mayor al de la copa abierta de Cleveland y se calienta en un recipiente apropiado para distribuir la temperatura uniformemente, hasta que adquiera la fluidez suficiente que facilite su vaciado en la copa.

- Procedimiento de la prueba

a) Se monta y sujeta el termómetro de manera que el extremo inferior del bulbo quede a 6.4 mm del fondo de la copa abierta de Cleveland, previamente colocada en la placa de apoyo, en un punto situado a la mitad de la distancia entre el centro y la pared de la copa opuesta al aplicador de flama como se muestra en la figura 21, cuidando que el eje de giro del aplicador de flama, el centro de la copa y el eje del termómetro queden en el mismo plano vertical.



Figura 21. Fijación del termómetro al soporte

b) Se vacía lentamente en la copa abierta de Cleveland el material asfáltico preparado, como se ve en la imagen de la figura 22, hasta que la parte superior del menisco coincida con la marca de aforo de la copa, eliminando cualquier burbuja que se forme

en la superficie de la muestra de prueba vertida. En el caso de rebasar la marca de aforo se eliminará el exceso de asfalto utilizando cualquier medio apropiado.



Figura 22. Copa Cleveland con asfalto

c) Se enciende el aplicador de flama y se ajusta ésta para que tenga un diámetro aproximado de 3 a 5 mm como se muestra en la figura 23, lo cual se verificará por comparación con una esfera de referencia, instalada en la placa de apoyo después de lo cual el aplicador se mantiene alejado de la copa mientras no se le requiera.



Figura 23. Aplicador de flama

d) Se aplica calor a la muestra de prueba de manera que su temperatura aumente a razón de 14 a 17°C/min, hasta que alcance una temperatura aproximada de 60°C abajo del punto de inflamación probable.

A continuación, se reduce gradualmente el calor aplicado a la copa de manera que al llegar la muestra a 30°C abajo del punto de inflamación probable, el incremento de temperatura sea de 5 a 6°C/min.

Como se observa en la figura 24, cuando la temperatura de la muestra de prueba sea de 30°C abajo del punto de inflamación probable, se inicia la aplicación de la flama pasándola de lado a lado de la copa, sobre el centro de la misma y con movimiento circular uniforme de manera que la duración del paso de la flama sobre la copa sea de 1 s aproximadamente y que el aplicador gire lo suficiente hasta formar un ángulo recto con el diámetro de la copa que pasa por el eje del termómetro.



Figura 24. Aplicación de flama sobre copa Cleveland

El centro de la flama de prueba se debe mover en un plano horizontal situado a no más de 2 mm arriba del borde superior de la copa. La flama se aplicará cada vez que la temperatura de la muestra se eleve 2°C.

e) Se registra como punto de inflamación t_1 como se observa en la figura 25, en grados Celsius con aproximación de 2°C, la temperatura leída en el termómetro cuando al

pasar el aplicador se produzca una pequeña flama instantánea o destello en cualquier punto de la superficie de la muestra, teniendo cuidado de no confundirla con el pequeño halo que suele tener la flama del aplicador.



Figura 25. Punto de inflamación alcanzado

f) Como se muestra en la figura 26, se continúa incrementando la temperatura de la muestra de prueba a razón de 5 a 6°C/min, pasando el aplicador de flama cada incremento de 2°C, hasta que se produzcan flamas que duren por lo menos 5 s, registrando en este momento la temperatura alcanzada t_2 , como el punto de ignición en °C con aproximación de 2°C.



Figura 26. Punto de ignición alcanzado

- Cálculos

Se reportan como punto de inflamación y punto de ignición del cemento asfáltico las temperaturas **t1** y **t2**, respectivamente con aproximación de 2°C.

- Precauciones para evitar errores

1. Realizar la prueba en un local libre de corrientes de aire y relativamente oscuro para que se puedan identificar fácilmente las flamas.

2. Evitar agitar los vapores que se desprendan de la copa al aplicar la flama de prueba, no haciendo movimientos bruscos ni respirando cerca de ella.

3. Lavar la copa con un disolvente adecuado para eliminar cualquier residuo de la prueba anterior. Si contiene partículas de carbón removerlas con fibra de acero y lavarla con agua fría, después acercarla a una flama o colocarla sobre una parrilla eléctrica para eliminar el disolvente y el agua.

3.2.3 Prueba: Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, así como de los residuos por destilación de las emulsiones y asfaltos rebajados, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de prueba de dichos materiales bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura [12].

- Equipo.
- **Aparato de penetración o penetrómetro para asfaltos** mostrado en la figura 27, el dispositivo para medir la profundidad de penetración de la aguja, en décimos de milímetro. También contará con un mecanismo que permita aproximar la aguja a la muestra de prueba y con pesas o lastres de 50 y 100 g.



Figura 27. Penetrómetro para asfaltos

- **Agujas** de acero inoxidable, totalmente endurecidas y perfectamente pulidas, con la forma y dimensiones que se muestran en la figura 28, que se acoplen al penetrómetro mediante un casquillo de bronce o de acero inoxidable, sobresaliendo de este último entre 40 y 45 mm.

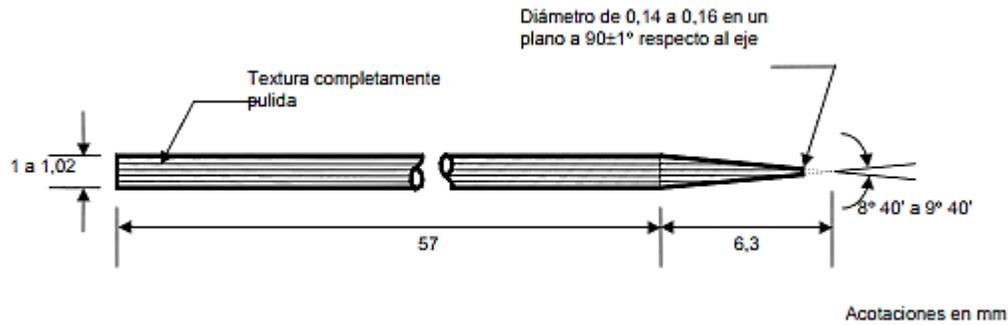


Figura 28. Aguja para prueba de penetración

- **Cápsula de penetración** de aluminio con forma cilíndrica y con el fondo plano mostrado en la figura 29, con diámetro interior de 55 mm y altura interior de 35 mm con diámetro exterior de 70 mm y altura exterior de 45 mm



Figura 29. Capsulas de aluminio para ensayar el asfalto

- **Baño de agua** con temperatura controlable hasta 50°C y aproximación de 0.1°C, con dimensiones y características tales que le permitan una capacidad mínima de 10 L.
- **Termómetro** con rango de 0 a 50°C y aproximación de 1°C.
- **Cronómetro** con aproximación de 0.2 s.
- **Recipiente de manejo** de metal, plástico o vidrio, de forma cilíndrica adecuada para manejar y mantener sumergida la cápsula de penetración que contenga la muestra de prueba de 350 cm³ de capacidad y con relieves en el fondo para evitar que la muestra que contiene se mueva durante el proceso de ensaye.

- Obtención de la muestra

Se toma una porción de volumen ligeramente mayor al de la cápsula de penetración y se calienta en un recipiente apropiado, agitándola en forma continua con el objeto de distribuir la temperatura uniformemente, hasta que adquiera la fluidez suficiente para facilitar su vaciado en dicha cápsula, cuidando que durante su calentamiento no se formen burbujas de aire y que esta operación se realice en un lapso menor de 30 min.

Hecho esto, inmediatamente se llena la cápsula con la muestra de prueba, se cubre adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.

- Procedimiento de la prueba

a) Como se muestra en la figura 30, Se coloca la cápsula de penetración que contiene la muestra de prueba dentro del recipiente de manejo, para introducirlos posteriormente en el baño de agua, cuando éste mantenga una temperatura de 25°C o la que se especifique para la prueba. Se sumerge dicho recipiente completamente y se mantiene así por espacio de 2 h con objeto de que el producto asfáltico adquiera esa temperatura.



Figura 30. Introducción de muestras al baño maría

b) Se coloca el penetrómetro sobre una superficie plana, firme y sensiblemente horizontal, se le acopla la aguja y se lastra para que el elemento que se desplaza tenga una masa de 100 ± 0.1 g mostrado en la imagen de la figura 31, la masa que se especifique para la prueba y finalmente se nivela perfectamente el penetrómetro.



Figura 31. Nivelación de penetrómetro

c) Se colocan el recipiente y la cápsula sobre la base del penetrómetro, de tal manera que la muestra quede bajo la aguja como se muestra en la imagen de la figura 32, se ajusta la altura de la aguja hasta que haga contacto con la superficie de la muestra, lo que se logra haciendo coincidir la punta de la aguja con la de su imagen reflejada en la superficie de la muestra.



Figura 32. Ajuste de muestra en el penetrómetro

d) Se hace coincidir la manecilla del penetrómetro con el cero de su carátula, hecho esto se oprime el sujetador para liberar la aguja únicamente durante 5 s o durante el tiempo que se especifique para la prueba como se aprecia en la figura 33, después de lo cual se toma la lectura registrándola en décimos de milímetro.



Figura 33. Ajuste de lectura del penetrómetro

e) Se deben hacer por lo menos tres penetraciones sobre puntos diferentes de la superficie de la muestra de prueba, separados entre sí y de la pared de la cápsula de penetración 10 mm como mínimo. Se limpiará cuidadosamente la aguja después de cada penetración sin desmontarla y, de ser necesario, para ajustar la temperatura a 25°C o a la especificada para la prueba, se regresará el recipiente de manejo con la muestra al baño de agua.

- Cálculos

Se reporta como resultado de la prueba, el promedio de las profundidades a las que haya entrado la aguja en por lo menos tres penetraciones, expresadas en décimos de milímetro, valor conocido también como grado de penetración.

- Precauciones para evitar errores

1. Tener especial cuidado en realizar la prueba bajo las condiciones de temperatura y tiempo de penetración que se especifiquen.
2. Cuidar que no exista aire atrapado en la muestra de prueba.
3. Confirmar que la aguja esté perfectamente limpia en el momento de la penetración.
4. Cuidar que la aguja no toque el fondo del recipiente antes de finalizar el tiempo especificado

3.2.4 Prueba: Recuperación Elástica por Torsión en Cementos Asfálticos Modificados

Esta prueba permite determinar la capacidad de recuperación elástica de los materiales asfálticos modificados. La prueba consiste en inducir una deformación angular mediante un cilindro de acero de dimensiones específicas, embebido en una muestra de cemento asfáltico modificado, con el objeto de observar su capacidad de recuperación [13].

- Equipo y materiales
- **Aparato de torsión.** Para imponer una deformación angular a la muestra mostrado en la figura 34



Figura 34. Aparato de torsión

- **Baño de agua** con temperatura controlable hasta 50°C y aproximación de 0.1°C, con dimensiones y características tales que le permitan una capacidad mínima de 10 L.
- **Termómetro** con rango de 19 a 27°C y aproximación de 0.1°C
- **Cronómetro** con aproximación de 1 s.

- Procedimiento de la prueba

a) Como se muestra en la imagen de la figura 35, se centra y fija el molde para la muestra dentro del baño, antes de agregar el agua de tal manera que quede bien fijo la semicorona graduada y el cilindro en cual nos ayudara a tomar la lectura.

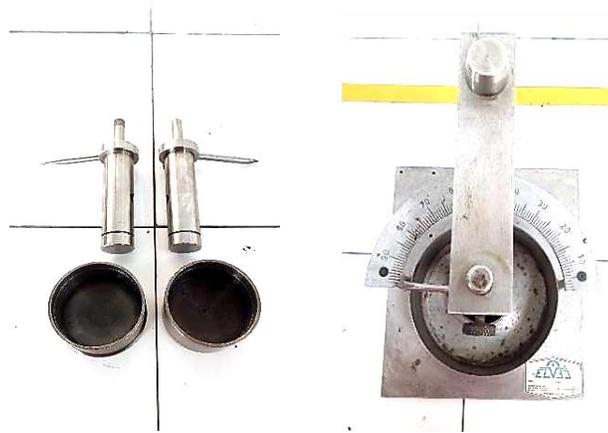


Figura 35. Partes del aparato de torsión

b) Se ajusta el cilindro metálico de tal forma que su base inferior quede a una distancia de 20 mm del fondo del molde como se aprecia en la figura 36, previamente al vertido de la muestra para posteriormente trabajar el asfalto contenido.

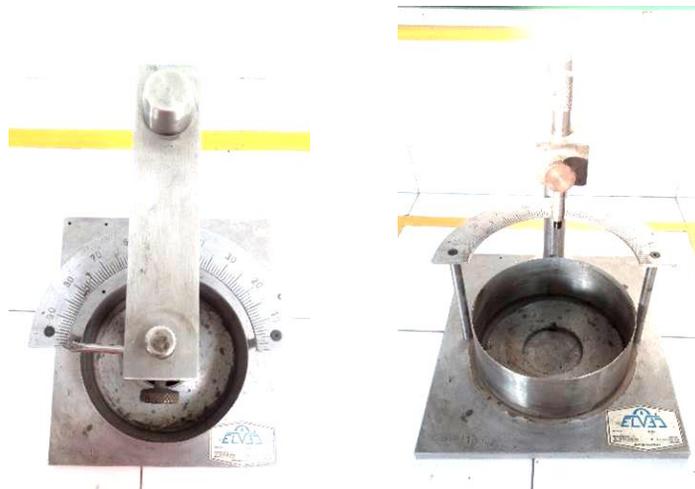


Figura 36. Ajuste del cilindro de ensaye

c) Se deja enfriar el conjunto formado por el molde, la muestra y el cilindro metálico, durante 1 h como mínimo de tal modo que se vea como en la figura 47, hasta alcanzar la temperatura ambiente.



Figura 37. Capsula de asfalto fijado en el cilindro

d) Se hace circular agua por el baño a una temperatura de $25 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ mostrado en la figura 38, durante al menos 90 min, con el fin de equilibrar la temperatura del agua y de la muestra de prueba. El nivel del líquido en el baño estará por encima del recipiente con la muestra.



Figura 38. Baño maría de la muestra de ensaye

e) Se introduce el pasador en el espacio que para tal efecto tiene el cilindro metálico y con su ayuda se hace girar dicho cilindro 180° en el sentido de las manecillas del reloj, se lleva la barra indicadora de 180° a 0°, en un tiempo comprendido entre 3 y 5 s como se aprecia en la figura 39, hecho esto, se retira inmediatamente el pasador para que no interfiera con el desarrollo posterior de la prueba.

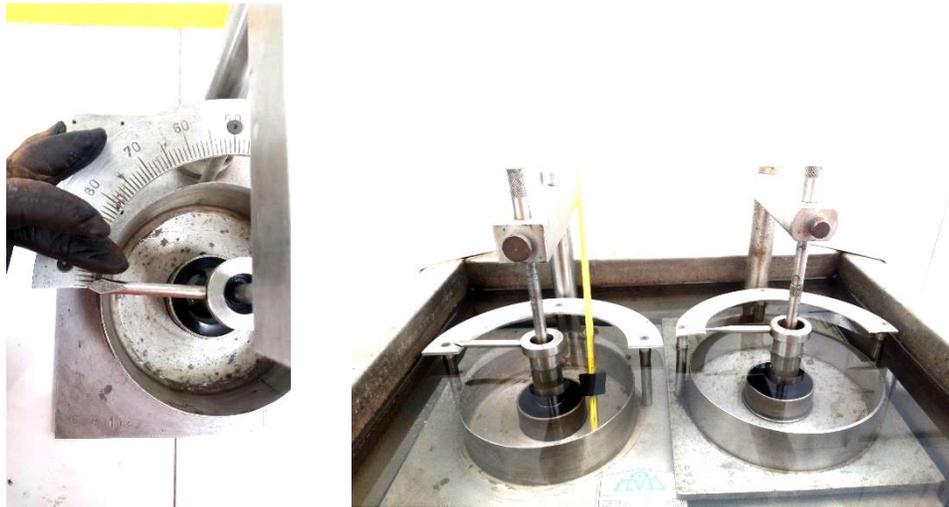


Figura 39. Ajuste del cilindro

f) Transcurridos 30 min \pm 15 s se registra la lectura indicada por la barra sobre la semicorona graduada de tal modo como se ve en la imagen de la figura 40, como el valor del ángulo recuperado (L).



Figura 40. Toma de lectura de la semicorona graduada

- Cálculos

Se reporta como resultado de la prueba, el porcentaje de recuperación con respecto al ángulo inicial de 180°, utilizando la ecuación 1.

$$\mathbf{Re = \frac{L}{180} * 100} \quad \mathbf{(1)}$$

Donde:

Re = Recuperación elástica por torsión (%)

L = Ángulo recuperado (°)

- Precauciones para evitar errores

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de prueba.
2. Realizar la prueba bajo las condiciones de temperatura y tiempo señalados.
3. Evitar que exista aire atrapado en la muestra de prueba.
4. Confirmar que el equipo esté perfectamente limpio en el momento de la prueba, especialmente el cilindro metálico.

3.2.5 Prueba: Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos

Esta prueba permite estimar la consistencia de los cementos asfálticos y se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 mm, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua o glicerina [14].

- Equipo
- **Sistema de soporte** porta anillos de latón, con la forma y dimensiones señaladas en la figura 41, con un soporte de metal resistente a la corrosión, integrado por dos columnas que sostengan el porta anillos y a una placa rectangular inferior, de forma que la distancia entre la parte inferior de aquel y la superior de ésta sea de 25 mm, y sujetas a una placa circular que sirva de tapa para el vaso refractario.



Figura 41.- Montaje del sistema de soporte

- **Esferas** de acero, de 9,5 mm de diámetro y de 3.5 ± 0.05 g de masa.
- **Guías** de latón para centrar las esferas, con la forma y dimensiones mostradas en la figura 41.
- **Parrilla eléctrica** adaptada para controlar la aplicación de calor.
- **Termómetro** de inmersión total con rango de -1 a 175°C y aproximación de 0,5°C.

- **Antiadherente** parafina para recubrir la placa de apoyo y evitar su adherencia con el asfalto.
- Preparación de la muestra

a) De la muestra se toma una porción de volumen ligeramente mayor al necesario para llenar los anillos y se calienta en un recipiente apropiado, agitándola en forma continua para distribuir la temperatura uniformemente, hasta que adquiera la fluidez que permita su vaciado en los anillos.

b) Como se muestra en la figura 42, se prepara previamente para que no se le adhiera la muestra de cemento asfáltico aplicándole el antiadherente seleccionado, a continuación, se vierte en los anillos el cemento asfáltico y se deja enfriar durante aproximadamente 30 min para que recobre su consistencia sólida, quitando el exceso de material asfáltico



Figura 42. Anillos que contendrán el asfalto

- Ejecución de la prueba

c) Se ensambla el sistema de soporte colocando en su lugar los anillos con la muestra de prueba como se observa en la figura 43, las guías y el termómetro de manera que la parte inferior de su bulbo quede al mismo nivel que la parte inferior de los anillos, sin que toque las paredes del orificio central del porta anillos.



Figura 43. Ajuste del soporte para ensaye

d) Se llena el vaso de vidrio hasta una altura de 10 cm, con agua potable a $5 \pm 1^\circ\text{C}$ si el punto de reblandecimiento esperado es menor de 80°C o glicerina a $30 \pm 1^\circ\text{C}$, como se ve en la imagen de la figura 44, introduce en el vaso el sistema de soporte y se deja el conjunto durante 15 min, manteniéndolo a la temperatura indicada para el líquido que se utilice, introduciendo el vaso en agua helada si es necesario.



Figura 44. Vaso de precipitado con la muestra de asfalto

e) Se extrae el sistema de soporte con las pinzas como se ilustra en la figura 45, se colocan las esferas en las guías e inmediatamente se vuelve a introducir en el vaso, quedando el montaje del equipo.

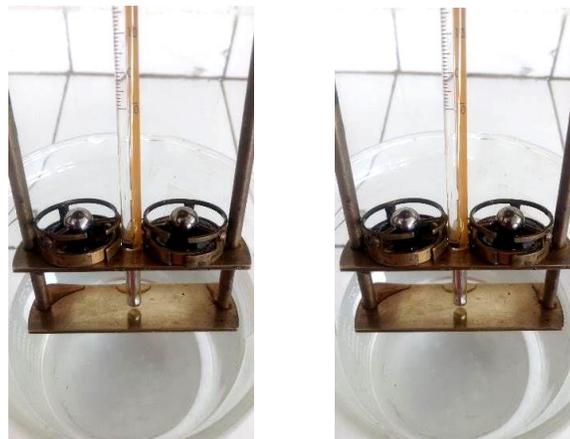


Figura 45. Guía para centrar la esfera

f) Se coloca el conjunto en la parrilla eléctrica o mechero y se incrementa uniformemente la temperatura del líquido a razón de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ representado en la figura 46, con una tolerancia $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en lecturas hechas cada minuto después de los primeros 3 min.



Figura 46. Muestra puesta en parrilla

g) Se registra para cada anillo la temperatura en el momento en que el material asfáltico toque la placa inferior del soporte, con aproximación de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Como se muestra en la imagen de la figura 47, Las temperaturas registradas no deben diferir entre sí en más de 1°C , de lo contrario se debe repetir la prueba utilizando una nueva muestra de prueba.



Figura 47. Transición del punto de reblandecimiento alcanzado

- Resultados

Se reporta como punto de reblandecimiento del cemento asfáltico el promedio de las temperaturas registradas, con aproximación de 0.5°C, indicando el líquido utilizado para la prueba.

- Recomendaciones para evitar errores

1. Cuidar que durante el llenado de los anillos no se formen burbujas de aire en la superficie o en el interior de la muestra de prueba.
2. Realizar la prueba en un local libre de corrientes de aire.
3. Cuidar que la temperatura con la que se inicie la prueba corresponda a la establecida para el líquido con el que se llene el vaso.
4. Evitar durante la prueba que la temperatura se eleve en incrementos diferentes al especificado.
5. Lavar los anillos con un disolvente adecuado para eliminar cualquier residuo de la prueba anterior. Si contienen partículas de carbón, removerlas con fibra de acero, lavarlos con agua fría y después acercarlos a una flama o colocarlos sobre la parrilla eléctrica para eliminar el disolvente y el agua.

3.3 Pruebas de calidad para agregado pétreo

3.3.1 Prueba: Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

Esta prueba permite determinar la composición por tamaños (granulometría) de las partículas del material pétreo empleado en mezclas asfálticas, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas.

El paso del material se hace primero a través de las mallas con la abertura más grande, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo, para así poder obtener la masa que se retiene en cada malla, calcular su porcentaje respecto al total y definir la masa que pasa [15].

- Equipo
- **Juego de mallas (cribas)** fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada conforme a lo indicado en las tablas 8 y 9.

Tabla 8. Juegos de mallas para grava

Designación	Abertura mm
2"	50
1½"	37,5
1¼"	31,5
1"	25
¾"	19
½"	12,5
⅜"	9,5
¼"	6,3
N°4	4,75

Tabla 9. Juegos de mallas para arena con finos

Designación	Abertura mm
N°10	2
N°20	0,85
N°40	0,425
N°60	0,25
N°100	0,15
N°200	0,075

- **Horno** eléctrico o de gas, con capacidad ventilado, con termostato capaz de mantener una temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- **Balanza** con capacidad de 2 kg y aproximación de 0.1 g.

- Obtención de las muestras de prueba

a) Se vacía cuidadosamente el material sobre la malla N°4 (4.75 mm), sin sobrepasar la capacidad de la malla y recolectando el material que pasa en una charola.

b) Utilizando la brocha, se retiran todas las partículas que se hubieran adherido a las paredes y al fondo del cubo metálico y a la malla para hacerlas pasar también por dicha malla a fin de no perder ninguna porción del material. Finalmente, se coloca la porción de material retenido en la malla N°4 en otra charola.

c) Se vierte en la balanza la porción que pasa la malla N°4 y se determina su masa, lo que representa la fracción de arena con finos de la muestra, registrándola como WSF, en g. De la misma forma se obtiene la masa del material retenido en dicha malla, lo que representa la grava, registrándola como Mg.

- Para la grava

d) Se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, registrándola como en g.

- Para la arena con finos

e) Se seca al horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, registrándola en g.

f) Del material seco se separan aproximadamente 500 g, los cuales se reducen por cuarteos, hasta obtener una masa de 200 g. Este material se coloca en el vaso metálico donde se le agregan 500 cm³ de agua, dejándolo reposar por un 12 h.

g) Hecho lo anterior, se lava el material decantando el vaso, para lo cual se agita su contenido en forma de “ochos” utilizando la varilla metálica, a la vez que se vierte sobre la malla N°200 (0.075 mm). Para facilitar el paso y eliminación de los finos, se aplica un chorro de agua con baja presión sobre el contenido de la malla, repitiendo esta operación hasta que el agua salga limpia.

h) Finalmente se regresa el material retenido en la malla N°200 al vaso metálico y se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, la cual se registra en g.

- Cribado

i) Con las muestras preparadas y teniendo listos los dos juegos de mallas, se procede a depositar sobre la malla superior (malla de mayor abertura) la fracción de grava o arena, según su caso, colocando finalmente la tapa. Para efectuar el cribado de la arena se empleará el material que se obtuvo de la fracción de 200 g que se lavó a través de la malla N°200.

- Agitación de forma manual

j) Se toma con ambas manos el conjunto de mallas, desde la charola de fondo y se procede a balancearlo de un lado a otro sobre una superficie rígida, haciendo este movimiento uniforme de tal modo que la agitación sea continua. El tiempo de cribado será el suficiente, determinado por experiencia o por comprobación de tal forma que se cumpla con lo anterior.

k) Finalmente se determina y registra la masa retenida en cada malla vertiendo su contenido en la balanza, considerando que las partículas que hayan quedado atoradas en cada retícula forman parte del material retenido de la malla correspondiente, por lo que se reintegrará este material cepillando las mallas por el revés.

- Verificación de la prueba

l) Para comprobar que el cribado se haya ejecutado en forma correcta, debe observarse para cada malla, que durante un minuto extra de cribado continuo no pase más del 1% de la masa del material retenido. Esto se hace de la siguiente manera:

m) Una vez separadas las mallas se manejan en forma individual, colocándoles sucesivamente una charola y una tapa bien ajustadas en cada uno de sus extremos.

n) Se coloca la malla en turno con su tapa y charola en posición ligeramente inclinada sobre una superficie rígida, se balancea con rapidez de un lado a otro, dando un ligero

golpe con la mano aproximadamente a cada sexto de vuelta hasta completar 25 golpes.

ñ) Para la determinación de la eficiencia del cribado de tamaños mayores a la malla N°4, se limitará la cantidad de material sobre cada malla, de tal forma que sólo se permita colocar una capa de partículas cada vez, aunque esto implique efectuar la comprobación por partes hasta agotar todo el material de cada malla.

o) En el caso de que pase más del 1% a través de cualquier malla, se repetirá la prueba, considerando que si dicha malla forma parte del arreglo empleado para la arena sólo se repetirá el cribado de esa parte, aplicando el mismo criterio en el caso de la grava.

- Cálculos

Se reporta el porcentaje retenido acumulado de cada malla, el cual se determina sumando el porcentaje retenido parcial de cada malla más el porcentaje retenido acumulado obtenido en la malla anterior y así sucesivamente, comenzando con la cantidad de finos hasta llegar a la malla de mayor abertura, sumando el 100% del material.

- Precauciones para evitar errores

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire que puedan provocar la pérdida de partículas de las muestras de prueba.

2. Cuidar que las muestras estén perfectamente secas al momento de efectuar su cribado.

3. Que todo el equipo esté perfectamente limpio y funcional. Especialmente las mallas estarán limpias y sin indicios de falla, es decir, que los hilos presenten aberturas uniformes y no estén dañados ni rotos.

3.3.2 Prueba: Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

Esta prueba permite determinar el contenido de partículas de formas alargada y lajeada presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en separar el retenido en la malla N°4 de una muestra de materiales pétreos, para determinar la forma de cada partícula, empleando calibradores de espesor y de longitud [16].

- Equipo
- **Juego de mallas (cribas)** fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada conforme a lo indicado en la tabla 10.
- **Balanza** con capacidad de 20 kg y aproximación de 1.0 g

Tabla 10. Juegos de mallas para material pétreo grueso

Designación	Abertura mm
2"	50
1½"	37,5
1"	25
¾"	19
½"	12,5
¾"	9,5
¼"	6,3
N°4	4,75

- **Charolas** de lámina galvanizada, con forma rectangular de aproximadamente 40 x 70 x 20 cm.
- **Calibrador de espesores** para separar las partículas de agregado pétreo con la forma y dimensiones que se muestran en la figura 48.
- **Cucharón** de acero galvanizado de 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un cajón rectangular con cuatro caras, cuya cara menor tenga un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.

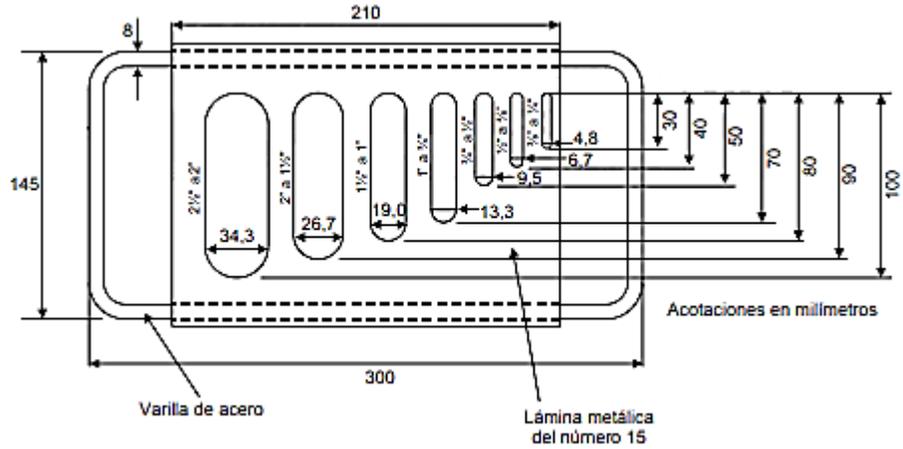


Figura 48. Calibrador de espesores

- **Calibrador de longitudes** para separar las partículas del material pétreo con dimensiones que se muestran en la figura 49.

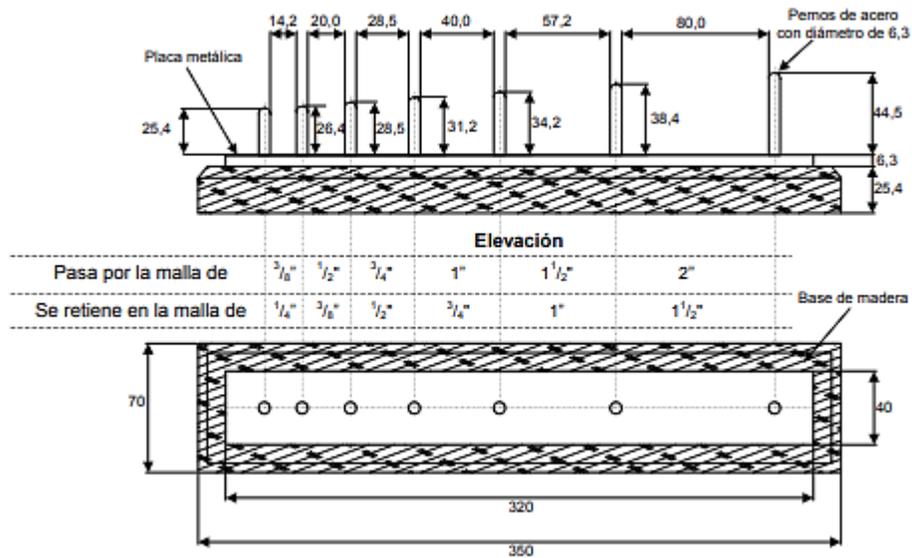


Figura 49. Calibrador de longitudes

- Selección del material para la prueba

a) Si la muestra del material envasado que se recibe en laboratorio está saturada, se extiende sobre una superficie limpia para dejar que se escurra hasta contenido de agua constante o en condición de saturado y superficialmente seco, para posteriormente disgregar de forma manual aquel material que presente grumos, teniendo la precaución de no fragmentarlo por la presión aplicada. Hecho lo anterior, se cuartea el material hasta obtener una muestra de 25 kg aproximadamente, como se describe en los siguientes Incisos.

b) Una vez que el material está disgregado, saturado y superficialmente seco, se apila hasta formar un cono.

c) Desde el eje del cono y hacia la periferia se extiende el material hasta formar un cono truncado de 15 a 20 cm de altura.

d) Se divide el cono truncado en cuatro partes iguales, de las cuales se toman dos cuartos opuestos para formar una muestra de aproximadamente 25 kg en caso de exceder esta masa, se procede a reducir la cantidad de material mediante cuarteos sucesivos.

e) Una vez separados los 25 kg se criba la muestra a través de la malla N°4 (4.75 mm) ya sea con equipo mecánico o de forma manual, colocando en una charola el material retenido y eliminando el material que pase por la malla.

- Obtención de las muestras de prueba

Esta prueba se realiza por duplicado, por lo cual se requieren dos muestras. Para la obtención de cada una de éstas se aplicarán cuarteos, considerando lo siguiente:

f) Se selecciona una porción del material retenido en la malla N°4 que contenga más de 200 piezas, la cual se somete a un proceso de cribado mediante alguno de los métodos descritos en el Manual M-MMP-4-04-002, Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, considerando el arreglo de mallas indicado en la Tabla 10.

g) Se registra el número de partículas retenido en cada malla verificando que al final el total de partículas retenidas por todas las mallas sea de 200 piezas como mínimo. Si el número de piezas es menor, se repetirá el procedimiento indicado en el Inciso anterior, aumentando el tamaño de la muestra hasta obtener el número de piezas mencionado.

h) La masa total de cada una de las dos muestras obtenidas, se designará como M1 y M2 respectivamente, en g.

- Procedimiento de la prueba

Para las partículas con forma alargada.

i) Para cada porción clasificada de cada una de las dos muestras de prueba, es decir, del número de partículas retenido en cada malla, como se ve en la figura 50 se verifica que cada pieza pase por la ranura correspondiente del calibrador de longitudes, buscando la posición tal que su dimensión mayor sea paralela al eje del calibrador.

j) Se reúnen todas las partículas que no hayan pasado por las ranuras del calibrador de longitudes y se determina su masa, designándola como **ma** en g.



Figura 50. Partículas pasando por el calibrador de longitudes

Para las partículas con forma de laja (aplanada)

k) Para cada porción clasificada de cada una de las dos muestras de prueba, es decir, del número de partículas retenido en cada malla, Como se aprecia en la figura 51 se verifica que cada pieza pase por la ranura correspondiente del calibrador de espesores, buscando la posición más adecuada.

l) Se reúnen todas las partículas que hayan pasado por las ranuras del calibrador de espesores y se determina su masa, designándola como **me** en g.



Figura 51. Partículas pasando por el calibrador de espesores

- Cálculos

Se calcula el porcentaje de las partículas con forma alargada, con relación a la masa de la muestra de prueba utilizada, empleando la ecuación 2.

$$Ca = \left(\frac{ma}{M} \right) * 100 \quad (2)$$

Donde:

Ca = Por ciento en masa de partículas con forma alargada, (%)

ma = Masa de las partículas con forma alargada, determinada en cada una de las muestras de prueba, según corresponda, (g)

M = Masa total de la muestra para cada una de las muestras de prueba, es decir, M1 ó M2, según corresponda, (g)

Se calcula el porcentaje de las partículas con forma de laja, con relación a la masa de la muestra de prueba utilizada, empleando la ecuación 3.

$$C_p = \left(\frac{m_e}{M} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

CP = Por ciento en masa de partículas con forma de laja, (%)

me = Masa de las partículas con forma de laja, determinada en cada una de las muestras de prueba, según corresponda, (g)

M = Masa total de la muestra para cada una de las muestras de prueba, es decir, M1 ó M2, según corresponda, (g)

- Precauciones para evitar errores

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire que puedan provocar la contaminación de la muestra de prueba con otras partículas.

2. Verificar que la muestra esté perfectamente seca al momento de efectuar su cribado.

3. Que todo el equipo esté perfectamente limpio y funcional. Especialmente las mallas estarán limpias y sin indicios de falla, es decir, que los hilos presenten aberturas uniformes y no estén dañados ni rotos.

4. Verificar que la balanza esté limpia en todas sus partes, bien calibrada y colocada en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas.

3.3.3 Prueba: Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la malla N°12 (1.7 mm de abertura), antes y después de haber sido sometida a este tratamiento [17].

- Equipo
- **Máquina de los ángeles** mostrada en la figura 52, constituida por un cilindro de acero, hueco y cerrado en ambos extremos, con diámetro interior de 710 ± 5 mm y largo de 510 ± 5 mm, con una velocidad angular de 30 a 33 rpm.



Figura 52. Máquina de los Ángeles

- **Carga abrasiva** esferas de hierro fundido o acero, con un diámetro promedio de 47 mm y una masa de entre 390 y 445 g cada una.
- **Juego de mallas (cribas)** fabricadas de acero inoxidable bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura con abertura determinada conforme a lo indicado en la tabla 11
- **Horno** eléctrico o de gas, con capacidad mínima de 20 dm^3 , ventilado, con termostato capaz de mantener una temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Tabla 11. Juego de mallas por tamaños

Designación	Abertura mm
2"	50
1½"	37,5
1"	25
¾"	19
½"	12,5
⅜"	9,5
¼"	6,3
Nº4	4,75
Nº10	2
Nº12 ^[1]	1,7

[1] Esta malla sólo se usará para el lavado del material posterior al tratamiento de desgaste, por lo que no se incluye en la obtención de la granulometría del material

- **Balanza** con capacidad de 20 kg y aproximación de 0.1 g
- **Charolas** de lámina galvanizada, con forma rectangular de aproximadamente 40 x 70 x 20 cm.
- Preparación de la muestra
 - a) De la muestra del material envasado que se recibe en laboratorio, se disgrega de forma manual el material que presente grumos, teniendo la precaución de no fragmentarlo por la presión aplicada. Hecho lo anterior, se cuarteo el material hasta obtener una muestra de aproximadamente 40 kg, como se describe a continuación
 - b) Una vez que el material está disgregado, se apila hasta formar un cono.
 - c) Desde el eje del cono y hacia la periferia se extiende el material hasta formar un cono truncado de 15 a 20 cm de altura.
 - d) Se divide el cono truncado en cuatro partes iguales, de las cuales se toman dos cuartos opuestos para formar una muestra de aproximadamente 40 kg en caso de exceder esta masa, se procede a reducir la cantidad de material mediante cuarteos sucesivos.
 - e) La muestra resultante se lava mediante un chorro de agua para eliminar el polvo adherido y posteriormente se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.

f) Considerando el arreglo de mallas indicado en la tabla 12, el material de la muestra se separa y clasifica obteniendo su granulometría, de acuerdo con el procedimiento establecido en el Manual M·MMP·4·04·002, Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, eliminando el material que pase por la malla N°10.

- Procedimiento de la prueba

g) Una vez separado y clasificado el material de la muestra, de la tabla 13 se elige el tipo de composición que se utilizará para integrar la muestra de prueba, que mejor se asemeje a las características granulométricas obtenidas.

h) Se integra la muestra de prueba con las proporciones correspondientes a cada rango de tamaños, de acuerdo con las cantidades indicadas en la tabla 13.

i) Se obtiene la masa de la muestra de prueba integrada, registrándola como **Pi**, con aproximación de 1 g y se introduce a la máquina de Los Ángeles.

j) De acuerdo con lo indicado en la tabla 12, se define la cantidad de esferas requeridas y se verifica que su masa total cumpla con lo establecido en dicha Tabla. Hecho lo anterior, se introducen las esferas a la máquina de Los Ángeles como se ve en la figura 53, y se hace funcionar a una velocidad angular de 30 a 33 rpm, durante 500 revoluciones el desgaste de la trituración será el valor de **Pa**.



Figura 53. Introducción de materiales y esferas de abrasión

k) Se retira el material del interior de la máquina depositándolo en una charola. Se desecha la fracción de la muestra de prueba que pase la malla N°12 (1,7 mm de abertura), para lo que se puede hacer pasar el material por todas las mallas indicadas en la tabla 13.

Una vez desechado el material menor de 1.7 mm, se lava la muestra de prueba con un chorro de agua y se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, la masa final de la muestra será tomado como **Pf**.

Tabla 12.- Composición de la muestra de prueba y cargas abrasivas

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

- Cálculos

Se calcula y reporta como resultado de la prueba, el desgaste por trituración, utilizando la ecuación 4.

$$Pa = \left(\frac{Pi - Pf}{Pi} \right) * 100 \quad (4)$$

Donde:

Pa = Desgaste por trituración Los Ángeles, (%)

Pi = Masa inicial de la muestra de prueba, (g)

Pf = Masa final de la muestra de prueba mayor de 1.7 mm (malla N°12) (g)

- Precauciones para evitar errores

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire que puedan provocar la contaminación de la muestra de prueba con otras partículas.
2. Verificar que la muestra esté perfectamente seca al momento de efectuar los cribados.
3. Que la máquina de Los Ángeles esté perfectamente limpia y libre de residuos de material en su interior, que el mecanismo de control de revoluciones trabaje correctamente
4. Verificar que las esferas cumplan con las dimensiones y masas indicadas en la Tabla 2, respectivamente.
5. Verificar que la balanza esté limpia en todas sus partes, bien calibrada y colocada en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas.
6. Verificar que el horno esté limpio y completo en todas sus partes y que su termostato trabaje correctamente.

3.3.4 Prueba: Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

Esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.

La prueba consiste en agitar un cilindro, que contiene una muestra del material pétreo que pasa la malla N°4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla [18].

- Equipo
- **Botella** con capacidad aproximada de 4 L, con equipo sifón consistente en un tapón con dos orificios y un tubo de cobre doblado, como el que se muestra en la figura 54.
- **Tapón de hule** que permita tapar herméticamente al cilindro descrito en la Fracción anterior, a fin de evitar la pérdida de materiales o de solución.
- **Manguera de hule** para conectar el sifón al tubo irrigador. De 0.48 cm (3/16") de diámetro, con una pinza para obturarla.



Figura 54. Componentes de botella con sifón y tubo irrigador

- **Tubo irrigador** con diámetro exterior de 0.63 cm (1/4"), con uno de sus extremos cerrado formando una punta en forma de cuña. Contará con dos perforaciones

laterales hechas con una broca N°60, en los lados planos de la cuña, cerca de la punta.

- **Pisón** como el mostrado en la figura 55, formado por una varilla de 46 cm de longitud y 0.63 cm ($\frac{1}{4}$ " de diámetro. En su extremo superior contará con un lastre de masa de 1 kg y en el otro extremo tendrá una base hexagonal cónica. Tendrá un indicador del nivel de la arena en su parte media que ajuste en el interior cilindro de prueba.
- **Balanza** con capacidad de 2,000 g y aproximación de 0.1 g

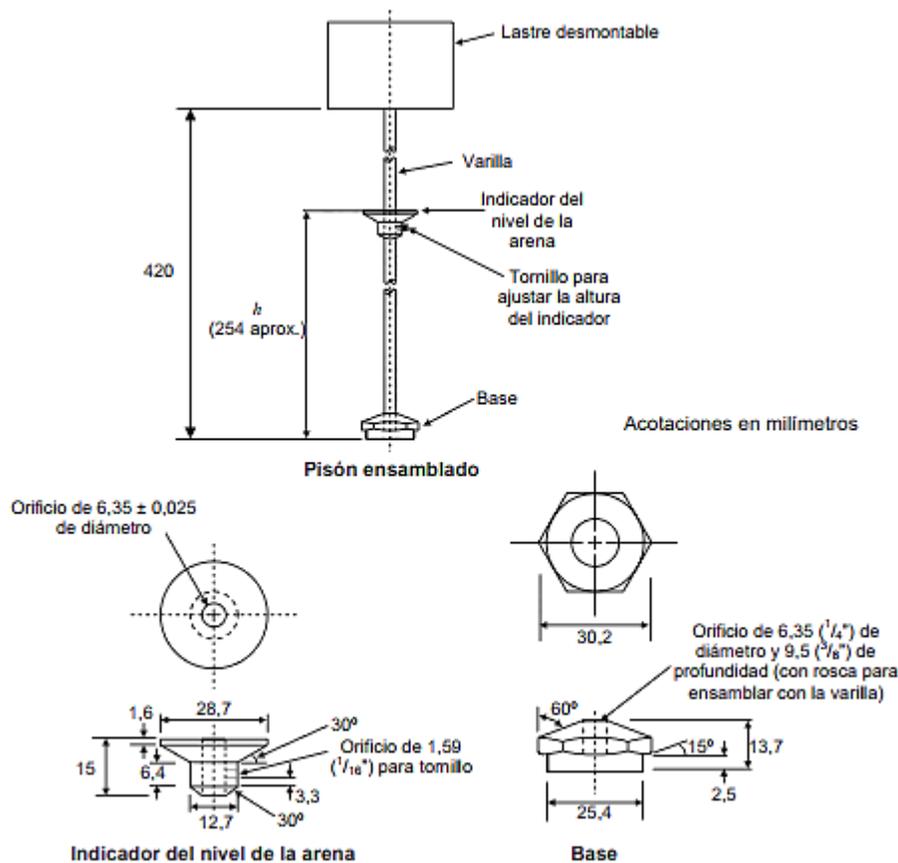


Figura 55. Pisón

- **Embudo para filtrado** de vidrio, con capacidad de 375 ml, que permita vaciar los reactivos de la solución de reserva.
- **Malla n°4** fabricada con alambre de bronce o de acero inoxidable, tejido en forma de cuadrícula y con aberturas de 4.75 mm

- **Papel filtro** Whatman N°12 o equivalente, de material resistente a los reactivos y soluciones que se utilizarán.
- **Cápsula** con capacidad de 90 ml
- **Embudo de boca ancha** para depositar la muestra dentro del cilindro.
- **Matraces Erlenmeyer** de vidrio, graduados, de 2,000 cm³ de capacidad.
- **Agitador automático** equipado con un cronómetro de dos velocidades (ASTM y California) y circuito de sincronización, accionado por un motor de 49.71 W (1/15 hp) y capaz de sostener de 175 a 180 ciclos por minuto con una extensión de carrera de 200 ± 3 mm, como el mostrado en la Figura 56.



Figura 56. Agitador mecánico

- **Componentes para elaborar una solución de reserva** Cloruro de calcio anhidrido, Glicerina USP, Formaldehído RA (Solución volumétrica al 40%)
- Preparación de las soluciones necesarias para la prueba

Previo al inicio de la prueba, se preparan las soluciones necesarias de acuerdo con lo indicado a continuación:

- a) Se disuelven 454 g de cloruro de calcio en 1.9 L de agua destilada.

b) Se enfría la solución al aire libre, hasta alcanzar la temperatura ambiente y después se pasa a través del papel filtro.

c) Se agregan 47 g de formaldehído y 2,047 g de glicerina, mezclándose bien y diluyéndose con agua destilada hasta completar 3.2 L de líquido.

- Solución de trabajo

Para preparar la solución de trabajo, en la botella equipada con el equipo sifón se diluyen 90 ml. de la solución de reserva en 3.8 L de agua destilada.

- Preparación de la muestra

d) Si la muestra del material envasado que se recibe en laboratorio está saturada, se extiende sobre una superficie limpia para dejar que se escurra hasta la condición de saturado y superficialmente seco, para posteriormente disgregar de forma manual aquel material que presente grumos, teniendo la precaución de no fragmentarlo por la presión aplicada. Hecho lo anterior, se cuarteo el material hasta obtener una muestra de 10 kg, como se describe a continuación:

e) Una vez que el material está disgregado, saturado y superficialmente seco, se apila hasta formar un cono.

f) Desde el eje del cono y hacia la periferia se extiende el material hasta formar un cono truncado de 15 a 20 cm de altura.

g) Se divide el cono truncado en cuatro partes iguales, de las cuales se toman dos cuartos opuestos para formar una muestra de aproximadamente 10 kg en caso de exceder esta masa, se procede a reducir la cantidad de material mediante cuarteos sucesivos.

h) Si la muestra original está seca, se humedecerá un poco antes de realizar la prueba a fin de evitar la pérdida del material fino durante el cribado.

i) Se hace pasar la muestra por la malla N°4, y si el material retenido en dicha malla presenta partículas finas adheridas, se frota entre las manos con guantes a fin de

desprender y recuperar dichas partículas, las cuales se añadirán al material que pasó la malla. El material retenido en la malla se elimina.

j) El material que pasa la malla N°4 se disgrega y se cuartea como se indica en los Incisos 2 a 4, hasta reducirlo a una masa de aproximadamente 2 kg.

k) Se llena la cápsula con este material hasta enrasar su superficie. Una vez llena, contendrá aproximadamente 110 g de material suelto.

- Preparación del equipo

La botella equipada con el equipo sifón se coloca de tal manera que su base quede a 91.5 ± 2.5 cm de altura como en la figura 57, con relación a la superficie de la mesa de trabajo, uniendo la botella mediante la manguera al tubo irrigador.

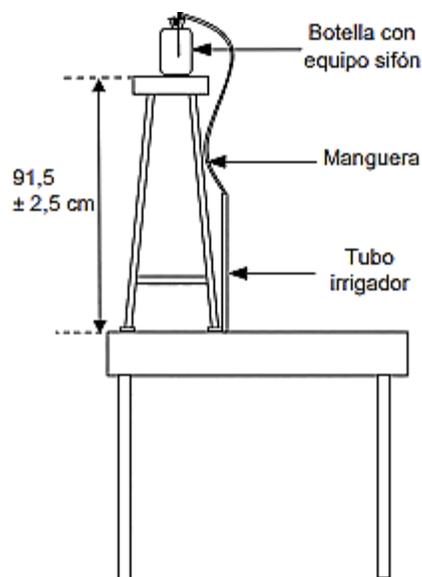


Figura 57. Habilitado del sifón

- Procedimiento de la prueba

Una vez preparado el sifón, se sopla dentro de la botella por la parte superior o a través de un pequeño tubo estando abierta la pinza, para que el sifón quede listo para usarse.

l) Por medio del sifón, se introduce la solución de trabajo al cilindro hasta una altura de 10 cm (4") como se muestra en la figura 58.



Figura 58. Probetas con solución de trabajo

m) Con la ayuda del embudo, se vacía al cilindro de prueba la muestra de material contenida en la cápsula, golpeando firmemente varias veces el fondo del cilindro contra la palma de la mano para eliminar las burbujas de aire atrapado dentro del material y acelerar la saturación de la muestra.

n) Se deja reposar la muestra durante 10 min como se muestra en la figura 59, se cierra el cilindro de prueba con un tapón.



Figura 59. Probetas en reposo del material previo a la agitación

- Agitado con equipo

ñ) Si se utiliza un equipo de operación eléctrica, se coloca el cilindro de prueba sobre el dispositivo y se programa el número de ciclos para que el equipo aplique la agitación automáticamente con los parámetros de longitud y tiempo que se requieren.

o) Concluida la agitación, se coloca el cilindro sobre la mesa de trabajo y se le quita el tapón, inmediatamente se le inserta el tubo irrigador con el cual se lavan las paredes del cilindro de arriba a abajo hasta concluir en el fondo. Con el fin de hacer la irrigación uniforme en todo el recorrido, se gira el cilindro conforme avanza el tubo irrigador, propiciando la separación entre el material arcilloso y el arenoso.

p) Cuando el nivel del líquido llegue a 38.1 cm (15”), medido sobre la escala del cilindro de prueba, se extrae lentamente el tubo irrigador sin cortar el flujo de solución, de manera que el nivel del líquido se mantenga en los 38.1 cm después de retirar completamente el tubo.

q) Se deja reposar el cilindro durante 20 min como se ve en la figura 60, evitando cualquier movimiento o vibración durante este período, transcurrido el cual, la arena se ha sedimentado y los finos permanecen en suspensión.

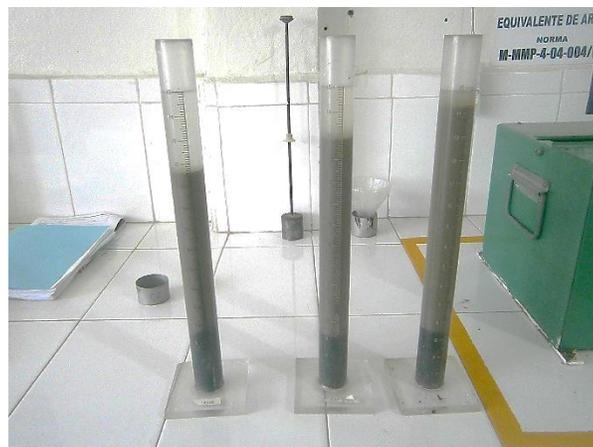


Figura 60. Reposo de las muestras para toma de lecturas posteriores

r) Se mide y registra como **LNS finos** el nivel superior de los finos en suspensión, con aproximación de 2 mm (0.1" aprox.) como se muestra en la figura 61

dicha lectura se hará en condiciones de iluminación que permitan apreciar claramente el nivel máximo de las partículas, observando el cilindro desde uno de sus lados, de tal manera que la línea de visión forme ángulo recto con la pared del cilindro.

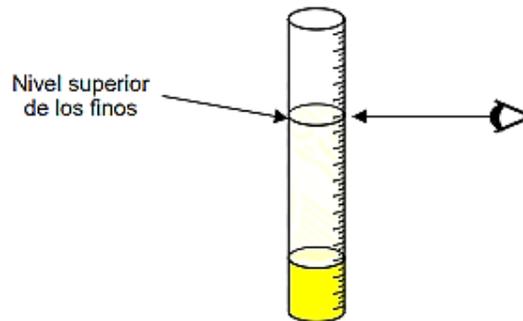


Figura 61. Medición del nivel de los finos

s) A continuación, se introduce lentamente la varilla con pisón dentro del cilindro, cuidando de no formar turbulencias, hasta que la base descansa sobre la arena, como se muestra en la figura 62.

Se observa el nivel de la parte superior del indicador en la escala del cilindro, se le resta la altura h (254 mm aprox.) y se registra como el nivel superior de la arena **LNS arena**, con aproximación de 2 mm (0.1" aprox.).

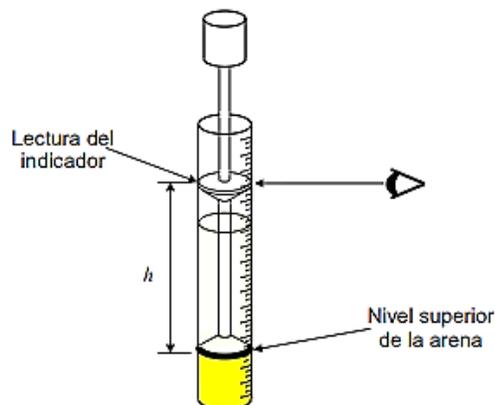


Figura 62. Medición del nivel de arena

Una vez concluida la prueba, se limpia el cilindro, tapándolo y agitándolo en posición vertical se voltea y se destapa para vaciarlo inmediatamente. Para finalizar se lava dos veces con agua, hasta eliminar cualquier residuo de material en su interior.

- Cálculos

Se calcula y reporta como resultado de la prueba el equivalente de arena, utilizando la ecuación 5.

$$\%EA = \left(\frac{\text{LNS arena}}{\text{LNS finos}} \right) * 100 \quad (5)$$

Donde:

%EA = Equivalente de arena (%)

LNS arena = Nivel superior de la arena (cm)

LNS finos = Nivel superior de los finos (cm)

- Precauciones para evitar errores.

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, bien ventilado, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de material.

2. Verificar que los reactivos y soluciones correspondan a las características de los materiales indicados en el procedimiento de prueba.

3. Cuidar que las lecturas se tomen inmediatamente después de terminado el periodo de reposo del material, sin realizar movimientos bruscos para no alterar las partículas.

3.3.5 Prueba: Azul de Metileno de Materiales Pétreos en Mezclas Asfálticas

Esta prueba permite estimar el grado de reactividad de los materiales finos, con partículas menores de 0.075 mm (malla N°200), contenidos en los materiales pétreos para mezclas asfálticas. La prueba consiste en añadir a los finos dosificaciones controladas de azul de metileno, hasta que ya no lo absorban más. Mientras más azul de metileno retengan los finos, serán más activos, lo cual proporciona un índice indirecto de su potencialidad expansiva [19].

- Equipo
- **Malla n°200** con abertura nominal de 0.075 mm (malla N°200). de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura.
- **Horno** eléctrico o de gas, ventilado, con termostato capaz de mantener una temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- **Balanza** con capacidad de 2 kg y aproximación de 0.1 g
- **Matraz volumétrico** con capacidad de 1,000 ml
- **Vaso de precipitado** con capacidad de 50 ml
- **Agitador magnético con barra agitadora** con barra agitadora de tamaño tal que pueda realizarse una agitación vigorosa en el vaso de precipitado de 50 ml.
- **Bureta** con capacidad de 50 ml. y graduada a cada 0.1 ml.
- **Agitador de vidrio** de 8 mm de diámetro y 150 mm de longitud.
- **Cronómetro o reloj** con aproximación de 1 s.
- **Charolas** de forma rectangular de aproximadamente $40 \times 70 \times 20$ cm, forma circular de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura
- **Azul de metileno grado reactivo** envasado en una botella ámbar recubierta con papel aluminio, almacenada dentro de un gabinete oscuro a temperatura ambiente.
- **Papel de filtro** Whatman N°40.
- **Agua destilada** envasada en un recipiente cerrado que evite su contaminación.

- Preparación de la muestra.

a) Si la muestra del material envasado que se recibe en laboratorio está saturada, se extiende sobre una superficie limpia para dejar que se escurra hasta contenido de agua constante o en condición de saturado y superficialmente seco, para posteriormente disgregar de forma manual aquel material que presente grumos, teniendo la precaución de no fragmentarlo por la presión aplicada. Hecho lo anterior, se cuartea el material como se describe en los siguientes Incisos.

b) El material se apila utilizando la pala hasta formar un cono.

Desde el eje del cono y hacia la periferia se extiende el material hasta formar un cono truncado de 15 a 20 cm de altura.

c) Con ayuda de la regla se divide el cono truncado en cuatro partes iguales, de las cuales se toma el material de dos cuartos opuestos y se procede a reducir la cantidad de material mediante cuarteos sucesivos hasta obtener una muestra reducida de aproximada de 1 kg, que se coloca en la charola de lámina galvanizada.

d) La muestra reducida, depositada en la charola, se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.

- Obtención de la porción de prueba

En la charola circular se acopla a la malla N°200 y se separan mediante cribado los finos del material contenido en la charola de lámina galvanizada, para lo que éste se vacía poco a poco y cuidadosamente sobre la malla N°200 (0.075 mm), sin sobrepasar su capacidad, eliminando el material retenido y recolectando el material que pase en la charola circular.

Una vez concluido el cribado, de los finos recolectados en la charola circular se toma la porción de prueba de 1 g, y se vierte en el vaso de precipitado.

- Preparación de la solución de trabajo

En el matraz volumétrico se disuelve 1 g de azul de metileno grado reactivo en 1000 g de agua destilada, para obtener la solución de trabajo con una concentración de azul de metileno en agua destilada de 1/1000.

- Procedimiento de prueba

e) Al vaso de precipitado que contiene la porción de prueba, se le añaden 30 ml de agua destilada y se coloca sobre el agitador magnético, se introduce la barra agitadora y se comienza una agitación vigorosa.

Se llena la bureta graduada con la solución hasta la marca de 50 ml.

f) Cuando en el vaso de precipitado se observe que la suspensión de finos en agua destilada es uniforme, sin detener su agitación, con la bureta se le adiciona la solución de trabajo, en proporciones exactas de 1 ml. cada vez.

g) Al término de 1 min después de cada adición de 1 ml. de la solución de trabajo, con la punta de la varilla de vidrio se toma una gota de la suspensión en agitación y se vierte sobre el papel de filtro para observar la apariencia de la gota sobre el papel.

h) Se observa si sobre el papel de filtro se forma un pequeño halo color azul alrededor de la gota, como se ilustra en la figura 63. Si aún no se alcanza esta condición, se sigue adicionando solución de trabajo y tomando la gota.



Figura 63. Formación del halo color azul alrededor de la gota

i) Si se forma el halo, se continúa con la agitación 4 min más, se toma una nueva gota y si se vuelve a formar el halo después de ese tiempo adicional, se registra el contenido de la bureta como **C sol** en ml, de lo contrario no se ha alcanzado el punto final de la prueba y se repite el procedimiento indicado en dichas Fracciones.

- Cálculos

Se calcula y reporta el resultado de la prueba como “Azul de metileno”, utilizando la ecuación 6.

$$AM = \left(\frac{50 - C_{sol}}{W_f} \right) \quad (6)$$

Donde:

AM = Azul de metileno, (mg/g)

C_{sol} = Cantidad de solución de trabajo en la bureta al terminar la prueba (ml)

W_f = Masa de la porción de prueba = 1 g

- Precauciones para evitar errores

1. Que la prueba se realice en un lugar cerrado y limpio, con ventilación indirecta y libre de corrientes de aire que puedan provocar la pérdida de partículas finas de la muestra.
2. Que se evite la contaminación de la muestra con polvo del medio ambiente o durante su manipulación.
3. Que todo el equipo esté perfectamente limpio y funcional.
4. Que la balanza se encuentre debidamente calibrada y esté colocada en una superficie horizontal, sin vibraciones que alteren las lecturas.
5. Que la muestra sea representativa del material que se pretende evaluar.
6. Que el laboratorista que realice la prueba tenga la preparación y experiencia en la identificación del halo.

3.3.6 Prueba: Método de prueba para determinar la resistencia del agregado pétreo grueso a la degradación mediante el equipo Micro-Deval

El ensaye Micro-Deval es una medida de la resistencia a la abrasión y durabilidad del agregado mineral resultante de una combinación de factores incluyendo abrasión y triturado con bolas de acero en la presencia de agua. Una muestra con triturado estándar es inicialmente saturada en agua por no menos de una hora.

La muestra es posteriormente colocada en un molino de golpe con 2 litros de agua y una carga abrasiva consistente en 5,000 gramos de bolas de acero de 9.5 mm. El molino, el agregado, el agua y la carga se revuelven a 100 rpm por dos horas dependiendo del tamaño de la partícula.

La muestra es después lavada y secada al horno, la pérdida es la cantidad de material que pasa la malla de 1.18 mm (Num.16), expresada como un porcentaje de la masa de la muestra original.

La prueba de abrasión Micro-Deval es un ensaye de agregados pétreos gruesos que permite determinar la pérdida por abrasión en la presencia de agua de una carga abrasiva.

Muchos agregados son más susceptibles a la abrasión en presencia de humedad en un estado seco y el uso de agua en esta prueba incorpora esta reducción en resistencia a la degradación. Los resultados que se pelean con agregado seco de resultados del ensayo son útiles en la evaluación de la dureza y resistencia a la abrasión del agregado pétreo sujeto a la abrasión cuando no se dispone de información de servicio [20].

- Equipo
- **Máquina de abrasión Micro-Deval** Molino de golpe giratorio capaz de efectuar 110 ± 5 rpm como se aprecia en la figura 64



Figura 64. Máquina de abrasión Micro-Deval

- **Contenedor** como se observa en la figura 65, recipiente de acero inoxidable con capacidad de 5 litros con un diámetro externo de 194 de 202 milímetros y una altura interna entre 170 a 177 mm
- **Carga abrasiva** consiste en balines magnéticos de acero inoxidable. Estos deben tener un diámetro de $9.5 \pm .5$ mm Cada recipiente requiere una carga de $5,000 \pm 5$ gramos de balines.



Figura 65.- Contenedor y carga abrasiva

d) Sumergir la muestra en 2.0 ± 0.05 litros de agua a una temperatura de $20 \pm ^\circ\text{C}$. por un mínimo de una hora, ya sea en el contenedor Micro -Deval o algún otro contenedor adecuado.

e) Colocar la muestra en el contenedor Micro-Deval con $1,500 \pm 5$ g. de balines de acero y agua utilizada para saturar la muestra como se muestra en la figura 67, Colocar la tapa en su sitio y el contenedor en la máquina.



Figura 67. Balines para realizar la prueba de ensaye

f) Poner en marcha la maquina a $100 \pm \text{rpm}$ por $12,000 \pm 100$ revoluciones para las graduaciones mostradas en la sección de la tabla 13 y poniendo la muestra en el rotor de la máquina para que trabaje dentro del contenedor como la figura 68



Figura 68. Ajuste de Maquina de Los Ángeles

g) Verter cuidadosamente la muestra y los balines de acero sobre una malla de 4.75 mm Superpuesta en otra de 1.18 mm Tener cuidado en remover completamente la muestra del contenedor de acero inoxidable.

Lavar y manipular el material retenido en la malla con agua usando una manguera y la mano hasta que el lavado se vea claro, remover los balines de acero usando un imán u otro medio adecuad. Desechar el material menor a 1.18 mm

h) Combinar el material retenido en las mallas 4.75 mm y 1.18 mm tener cuidado de no perder material.

i) Secar al horno la muestra hasta masa constante a 110 ± 5 °C.

j) Pesar la muestra con aproximación a 1.0 g Registrar como “**B**”.

- Cálculos

Calcular la perdida por abrasión Micro-Deval con aproximación de 0.1 por ciento, con la ecuación 7.

$$\text{Porcentaje perdido} = (A - B) / 100 \quad (7)$$

3.4 Elaboración de especímenes

El método para el proyecto y control de mezclas elaboradas utilizando materiales pétreos que satisfagan los requisitos establecidos el procedimiento consiste fundamentalmente en elaborar especímenes cilíndricos a los cuales se les determinará su peso volumétrico porcentaje de vacíos estabilidad en sentido diametral y deformación al alcanzarse la máxima resistencia en estas dos últimas determinaciones se podrá hacer bajo condiciones desfavorables de humedad y temperatura a las mezclas también se les determinará la influencia del agua en su comportamiento.

3.4.1. Prueba: Método Marshall para mezclas asfálticas

El método Marshall para el proyecto y control de mezclas elaboradas utilizando materiales pétreos que satisfagan los requisitos establecidos el procedimiento consiste fundamentalmente en elaborar especímenes cilíndricos a los cuales se les determinará su peso volumétrico porcentaje de vacíos estabilidad en sentido diametral y deformación al alcanzarse la máxima resistencia en estas dos últimas determinaciones se podrá hacer bajo condiciones desfavorables de humedad y temperatura a las mezclas también se les determinará la influencia del agua en su comportamiento.

En este método el análisis de los parámetros mencionados permite conocer y controlar las condiciones más favorables de impermeabilidad y durabilidad de las mezclas con lo cual se pueden fijar márgenes para evitar exceso o escasez de aglutinante.

El valor de estabilidad es un índice de resistencia estructural de la mezcla asfáltica compactada y el flujo es un indicador de su flexibilidad y pérdida de resistencia a la deformación ambas propiedades ayudan por otra parte de juzgar las características de forma y superficie del material pétreo que integra la mezcla [21].

- Equipo.
- **Moldes metálicos** para compactación con diámetro interior de ciento uno punto seis más menos cero punto uno (101.6 ± 0.1 mm) milímetros y altura de 87.3 milímetros y extensión o collarín y una placa de base ambas para acoplarse indistintamente en los dos extremos de los seis moldes mostrado en la figura 69.



Figura 69. Molde de compactación para la prueba Marshall

- **Pedestal de compactación** como se ve en la figura 70 consistente en un bloque de madera llevando sujeta en su parte superior una placa metálica, teniendo el pedestal en su parte inferior dispositivos de anclaje para fijarlo en posición vertical



Figura 70. Equipo de compactación

- **Pisón de compactación** con superficie circular de apisonado de 98.4 mm de diámetro, teniendo una pesa deslizante de 4,536 gr, con altura de caída de 457.2 mm, como en la figura número 71.



Figura 71. Pisón de compactación Marshall

- **Máquina de prueba Marshall** Como se aprecia en la figura 72 con capacidad de 3,000 kg accionada con motor eléctrico, equipado con mordazas semicirculares para aplicar cargas a los especímenes de prueba a una velocidad constante de deformación de 50.8 mm por minuto y provista de un dinamómetro de anillo calibrado para cargas con sensibilidad de 10 kg.



Figura 72. Prensa Marshall

- **Baño de agua o tanque de saturación** con control termostático que mantenga una temperatura entre (20 - 80°C), con aproximación de 0.5°C, profundidad mínima de 150 mm, falso fondo perforado y dimensiones mínimas aproximadas de 42 cm por 32 cm.
 - **Horno** con temperatura controlable hasta de 200°C y aproximación de un grado centígrado 1°C, con tiro forzado de aire y dimensiones adecuadas para contener las charolas con las muestras de materiales.
 - **Balanza** de dos 2 kg de capacidad y 0.1 gr de sensibilidad
 - **Equipo de uso general** como charolas rectangulares, charolas redondas, cucharones espátulas, pinzas para vasos, guantes de hule, guantes de asbesto y papel filtro con forma circular con diámetro ligeramente menor que el molde de compactación.
- El procedimiento de prueba es el siguiente
 - a) Previamente a la preparación de las mezclas se determina el peso específico relativo aparente por inmersión el cemento asfáltico del material pétreo seleccionado, así también el del cemento asfáltico de acuerdo con la indicada último valor será corregido mediante los correspondientes gráficas peso específico en el caso de rebajados comunes para determinar el peso específico del residuo tomando en cuenta los solventes y agua que contenga el producto bajo las condiciones de compactación.
 - b) Se determinan las temperaturas de mezclado de cada material y la de compactación de la mezcla de acuerdo con lo siguiente:
 - c) El asfalto se calentarán a una temperatura adecuada para tener un mezclado preciso de los materiales
 - d) El material pétreo se calentará a una temperatura de mezclado más diez grados centígrados (+10°C) como se muestra en la figura 73, de tal manera que se obtenga el mejor cubrimiento para elaborar la mezcla.



Figura 73. Material pétreo calentado en el horno

e) La temperatura de compactación de la mezcla es aquella la cual el material asfáltico bajo las condiciones en que se encuentra al terminar el mezclado

f) Preparación de las mezclas de prueba para fines de diseño se lleva a cabo con la cantidad necesaria de material pétreo para que el espécimen tenga una altura aproximada de 63.5 mm y 1,100 gr de material pétreo

Las proporciones de cemento asfáltico que se deben utilizar para elaborar estas mezclas se definen con base del contenido óptimo aproximado determinado mediante la aplicación del procedimiento de acuerdo con lo siguiente

g) Las mezclas se prepararán por triplicado, cada una con los contenidos de asfalto a ensayar

h) Como se aprecia en la imagen de la figura 74, al terminar la operación de mezclado se tendrá en la mezcla de la temperatura de compactación determinada aplicando calor durante el mezclado



Figura 74. Mezclado del asfalto con el material pétreo

i) Se limpian la placa de compactación del pisón y los moldes de compactación y junto con el collarín, la espátula y placa de base respectivos, se calientan 90°C. como se muestra en la figura 75, un molde con su collarín y base, se arman poniendo en el fondo una de las hojas de papel filtro circular.



Figura 75. Fijación de moldes precalentados

j) Como se observa en la figura 76, Se vacía dentro del molde de la mezcla asfáltica elaborada y se acomoda con la espátula previamente calentada introduciendo 15 veces en la parte cercana del contacto de la mezcla con el molde y 10 veces en la porción central de la misma para acomodarla sin que se clasifique.



Figura 76. Colocación del material en los moldes

k) Se coloca el molde con su base y collares montados teniendo la mezcla de prueba sobre el pedestal de compactación y se ajusta el dispositivo que sostiene el molde se aplican con la pesa deslizante del pisón de compactación 75 golpes mostrado en la figura 77.

La altura de caída de la presa será de 457 mm, debiendo mantenerse el eje del pisón en posición normal a la base del molde.



Figura 77. Compactación del material

l) Una vez aplicado el número de golpes de compactación establecido se libera el molde de la sujeción y se remueve el collarín, se invierte el molde conteniendo el

espécimen y se ajusta sobre la placa de base se vuelven a colocar el collarín y el dispositivo que sostiene el molde y enseguida se aplica en la otra cara del espécimen el mismo número de golpes que en la cara primeramente mencionada.

m) Se determina con el calibrador la altura del espécimen dentro del molde y se anota en milímetros en la columna t de la hoja de registro, solo si dicha altura no es (63 ± 3) mm, la cantidad de mezcla empleada en la elaboración del siguiente espécimen deberá corregirse aplicando la ecuación 7.

$$P'e = \left(\frac{63 P_e}{H_e} \right) \quad (7)$$

Donde:

P'e = Es el peso corregido de la mezcla, para elaborar uno de los nuevos especímenes, en gramos

Pe = Es el peso del espécimen elaborado, en gramos

He = Es la altura del espécimen elaborado, en milímetros.

3.5 Pruebas de calidad para mezcla asfáltica.

3.5.1 Prueba: Peso volumétrico compactado

a) Para empezar a trabajar las pastillas se deben limpiar las orillas de sobrante de la misma mezcla que haya quedado después de la compactación frotando las caras de cada una de ellas.

b) Como se ve en la figura 78, se realiza las medidas de altura con ayuda de un vernier, tomando cuatro puntos para su medición sacando el promedio de estas medidas y anotando el resultado.



Figura 78. Registro de alturas de los especímenes a ensayar

c) Se pesa cada una de ellas y se anotara como peso del espécimen seco como se aprecia en la imagen de la figura 79.



Figura 79. Registro de peso seco de los especímenes

d) Se ajusta la temperatura del agua a $(22 \pm 1) ^\circ\text{C}$, como se ve en la imagen de la figura 80, sumergiendo con un tiempo de 1 minuto por cada una de ellas y anotando el peso como masa del espécimen sumergido en agua.



Figura 80. Registro de peso sumergido de los especímenes

e) Se retira del agua y se secan con ayuda de una franela previamente húmeda, cubriéndola por completo y frotando ligeramente para retirar el excedente de agua como se aprecia en la figura 81, se toma el nuevo valor como masa superficialmente seca al aire.

El valor de la masa del volumen del espécimen a 25°C será la diferencia de la masa superficialmente seca y masa del espécimen seco.



Figura 81. Registro de peso superficialmente seco de los especímenes

f) Para finalizar se aplica la siguiente fórmula que determina el peso volumétrico del espécimen en (kg/m³). utilizando los datos anteriormente registrados.

$$\text{Peso volumétrico del espécimen } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{1000 * M_{\text{seco}}}{\text{Masa del volumen del espécimen a } 25^{\circ}\text{C}}$$

3.16. Estabilidad y flujo

a) Se separan del molde que contiene el espécimen, la placa de base y su collarín y se deja enfriar dicho espécimen en el molde, el tiempo necesario para que al ser extraído no sufra deformaciones, para lo cual se introduce en caso necesario, durante una hora, en circulación del aire a 25°C.

Como se ve en la figura 82, a continuación, utilizando el extractor de especímenes, se saca cuidadosamente el espécimen del molde y se coloca sobre una superficie plana y horizontal, en donde permanecerá en reposo a la temperatura ambiente, antes de ser probado, durante 24 horas aproximadamente, contadas a partir de su elaboración.



Figura 82. Especímenes finales

b) Se moldean sucesivamente cada uno de los especímenes restantes del contenido de asfalto con que se inició la prueba, y después en la misma forma los demás especímenes de cada uno de los contenidos de asfalto considerados en el estudio.

c) Transcurrido el periodo de enfriamiento, se determina el peso volumétrico de cada uno de los especímenes de prueba, los datos obtenidos se anotan en la hoja de registro.

d) Como se ve en la imagen de la figura 83, a continuación, se sumergen todos los especímenes en el baño de agua, a una temperatura de sesenta más menos un grado centígrado ($60 \pm 1^\circ\text{C}$) durante un lapso de (30 a 42) minutos.

La determinación de la estabilidad y flujo se iniciará después de 30 minutos de inmersión para lo cual se van extrayendo sucesivamente los especímenes del baño, debiendo sacar y probar el ultimo a los 42 minutos, de haber sido introducido en el baño.

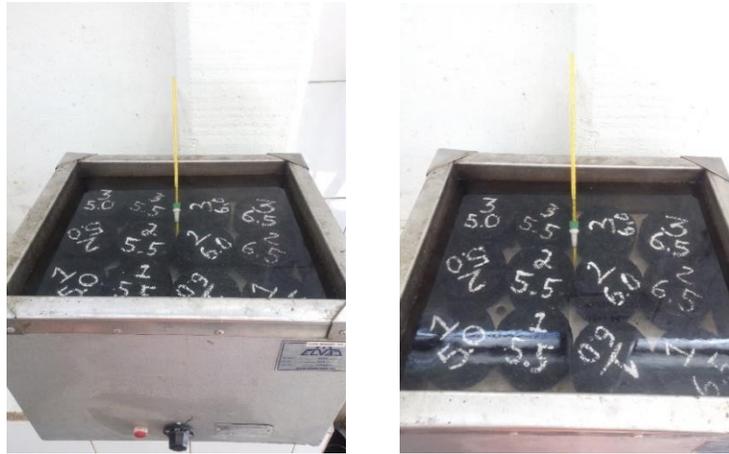


Figura 83. especímenes sumergidos en el baño maría

e) Se lubrican las guías de los cabezales de prueba, se limpian sus superficies interiores y se mantienen estos a una temperatura de treinta y cinco más menos tres grados centígrados ($35 \pm 3^{\circ}\text{C}$).

Se verifica que el extensómetro del anillo de carga instalado en la máquina de compresión marque cero (0) cuando no se esté aplicando carga.

f) Se saca un espécimen del baño de agua y se elimina la humedad superficial que presente, se coloca sobre la mordaza inferior y se centra se monta y se coloca sobre el espécimen la mordaza superior y en esta forma se lleva el conjunto a la presa Marshall de compresión, en donde se coloca y se centra nuevamente.

Como se ve en la figura 84, se instala sobre la varilla guía el extensómetro para medir el flujo, se ajusta a cero (0) su caratula y durante la aplicación de la carga se sujeta por el casquillo, oprimiéndolo contra el cabezal.



Figura 84. Fijación de especímenes en las mordazas

g) Se aplica carga al espécimen a una velocidad de deformación constante, de 50.8 mm por minuto, hasta que se presente la carga máxima ósea la necesaria para producir la falla del espécimen a la temperatura de prueba como se observa en la figura 85, dicha carga es el valor de estabilidad Marshall y se anotara en kilogramos.

Como antes se indicó, mientras la carga se esté aplicando se sostiene firmemente el extensómetro medidor del flujo sobre la varilla guía y al presentarse la carga máxima se toma la lectura correspondiente se registra con aproximación de 0.1 mm



Figura 85. Ensaye de la prensa Marshall

La deformación del espécimen en milímetros es el valor del flujo, el cual se anota en la columna y de la hoja de registro. Todo el procedimiento para efectuar las pruebas de estabilidad y flujo del espécimen deberá completarse en un periodo de 30 segundos contados a partir del momento en que el espécimen se retire del baño.

h) Se determina sucesivamente la estabilidad y flujo de cada uno de los especímenes restantes del contenido de asfalto con que se inició la prueba, se determinan los valores correspondientes a los especímenes de cada uno de los demás contenidos de asfalto considerados en el estudio.

i) Se registra los valores de la prensa Marshall para calcular y registrar los valores de:

Peso volumétrico – Proporción de asfalto.

Por ciento de vacíos de la mezcla – Proporción de asfalto.

Por ciento de vacíos del material pétreo – Proporción de asfalto.

Estabilidad – Proporción de asfalto.

Flujo – Proporción de asfalto.

j) El total de muestras a ensayar se conformarán de 66 especímenes, las primeras muestras de agregado serán de tres pastillas o especímenes por punto de asfalto del 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 y 7.5%, por lo que serán 18 especímenes con asfalto AC-20 y 18 con asfalto AC-20 Modificado Tipo I, esto en primer lugar para encontrar el punto óptimo de asfalto que cumpla con los requerimientos de trabajo.

Una vez obtenido el punto óptimo de asfalto se harán nuevamente tres pastillas o especímenes por punto de aditivo agregado del 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 y 1.4%, por lo que serán 15 especímenes de rediset wmx-8017a y 15 especímenes de surfatherm.

La tabla 14 y 15 contienen los requisitos de calidad a cumplir para la mezcla asfáltica de granulometría densa diseñadas mediante el método Marshall.

Tabla 14. Requisitos de calidad para mezclas de granulometría densa, mediante el método Marshall

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ^[1]	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ ^[2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (Ib _r), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo; mm (10 ⁻² in)	2 - 4 (8 - 16)	2 - 3,5 (8 - 14)
Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 5	3 - 5
Vacíos ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Para tránsitos mayores de 10⁷ ejes equivalentes de 8,2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

Tabla 15. Vacíos en el agregado mineral (V.A.M) 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 %		
		3	4	5
mm	Designación	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.

CAPÍTULO 4.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados de pruebas para asfalto

Al finalizar las pruebas para el asfalto ensayado se procede a comparar los resultados obtenidos con la tabla 3 y 4, que contienen los requisitos de calidad en cuanto a sus características y clasificación.

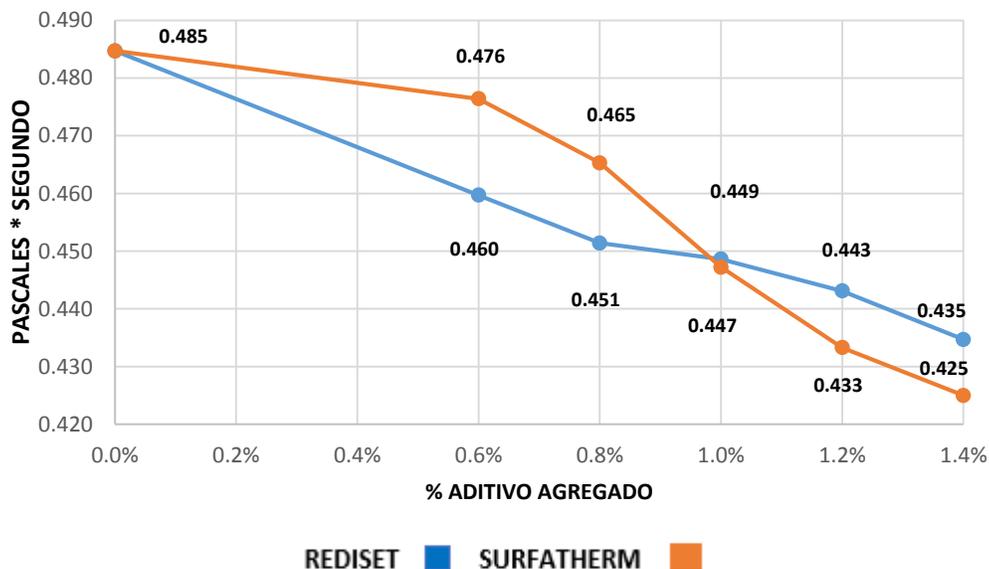
4.1.1. Resultados Viscosidad Rotacional Brookfield

Al finalizar dicha prueba, se obtuvieron las lecturas de viscosidad al ensayar el asfalto **AC-20** con los siguientes rangos:

AC-20 rediset = (0.485 a 0.435) Pa

AC-20 surfatherm = (0.485 a 0.425) Pa

Como se puede ver  la gráfica 1, los aditivos  rediset y surfatherm actúan  al asfalto **ac-20**  de tal manera que reducen su viscosidad respecto a la muestra sin aditivo, rediset tiene un valor de viscosidad más bajo al 06%, 0.8% a diferencia del surfatherm, donde ambos aditivos se encuentran al 1.0% con valores similares, por ultimo surfthaterm baja su viscosidad en los puntos 1.2% y 1.4% a diferencia de rediset, cumpliendo con el parámetro de viscosidad cinemática a 135°C máximo de 4 Pa.



Gráfica 1. Puntos de viscosidad Brookfield (AC-20)

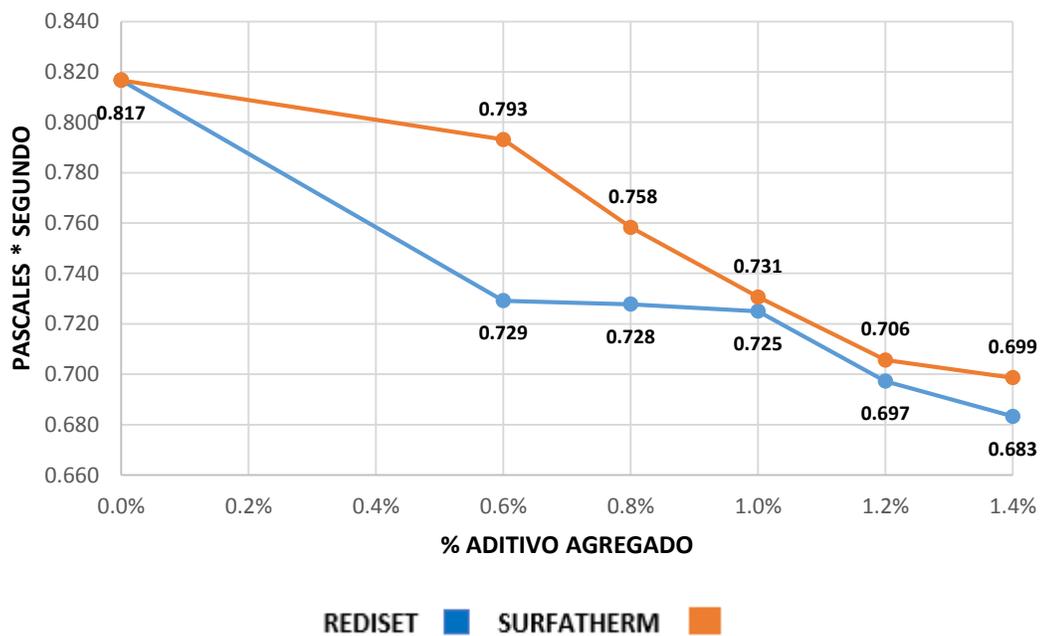
Posteriormente se obtuvieron los siguientes rangos con el contenido asfalto **AC-20 Modificado Tipo I**:

AC-20 Modificado Tipo I - rediset = (816.7 a 683.3) cP



AC-20 Modificado Tipo I - surfatherm = (816.7 a 698.6) cP

Para el caso del asfalto modificado también baja su viscosidad en comparación a la muestra sin aditivo como se muestra en la gráfica 2, rediset al 0.6% y 0.8% están por debajo de surfatherm, hasta el punto al 1.0%, 1.2% y 1.4% donde tienen valores similares, cumpliendo con el parámetro de viscosidad rotacional Brookfield a 135°C máximo de 4 Pa.



Gráfica 2. Puntos de viscosidad Brookfield (AC-20 MODIFICADI TIPO I)

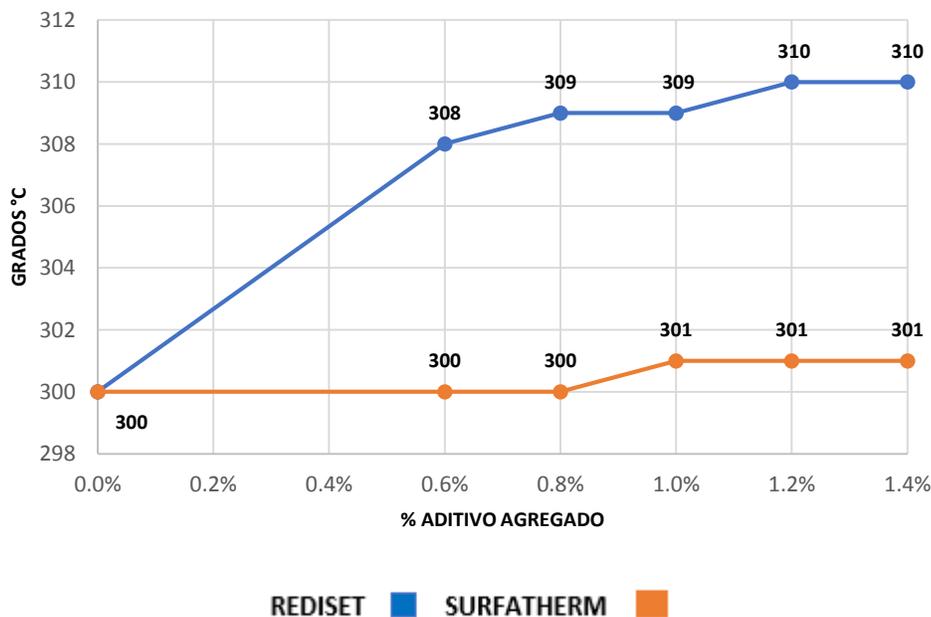
4.1.2. Resultados Punto de inflamación

Una vez terminada la prueba se obtuvieron los siguientes rangos para el asfalto **AC-20** ensayado:

AC-20 sediset = (300 a 310) °C

AC-20 surfatherm = (300 a 301) °C

El asfalto con rediset está por arriba del punto de inflamación con 8°C respecto a la muestra sin aditivo como se aprecia en la gráfica 3, después en los puntos al 0.8%, 1.0%, 1.2% y 1.4% tienen una variación de 1°C. Por otro lado, surfatherm mantiene la misma temperatura de punto de inflamación al 0.6% y 0.8% posteriormente los puntos al 1.0%, 1.2% y 1.4% varían de igual manera con un 1°C, cumpliendo con el parámetro mínimo de inflamación de 232 °C.



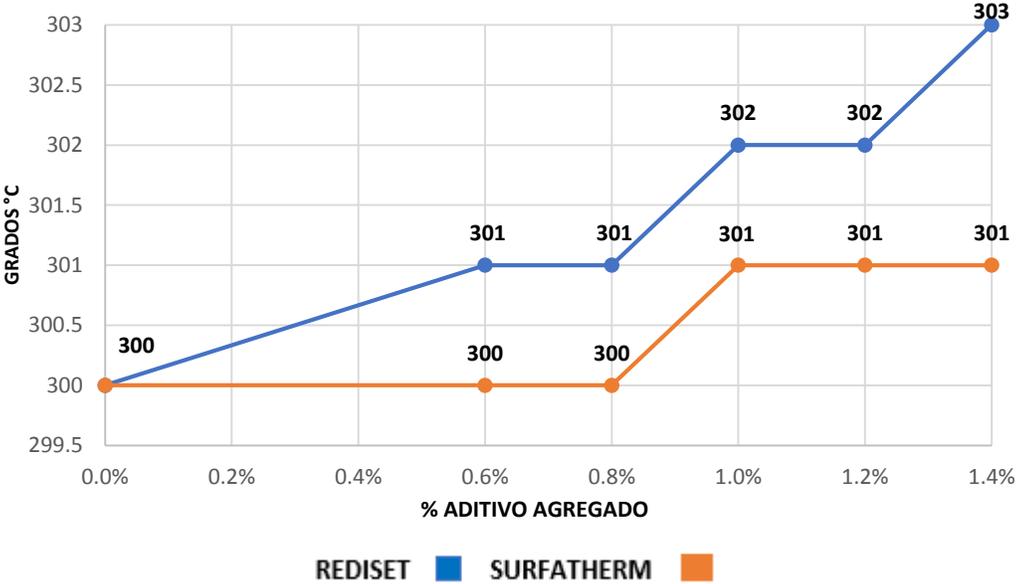
Gráfica 3. Punto de Inflamación (AC-20)

Para el asfalto **AC-20 Modificado Tipo I**, se obtuvieron los siguientes rangos de punto de inflamación.

AC-20 Modificado Tipo I - rediset = (300 °C a 303) °C

AC-20 Modificado Tipi I - surfatherm = (300 °C a 301) °C

El asfalto con rediset aumenta 1°C respecto a la muestra sin aditivo como se observa en la gráfica 4, y sube 1°C más gradualmente para el resto de los puntos. Para surfatherm se mantiene con la misma temperatura al 0.6% y 0.8% y de igual manera aumenta 1°C para el resto de los demás puntos, cumpliendo con el parámetro mínimo de inflamación de 230 °C.



Gráfica 4. Punto de Inflamación (AC-20 MODIFICADO TIPO I)

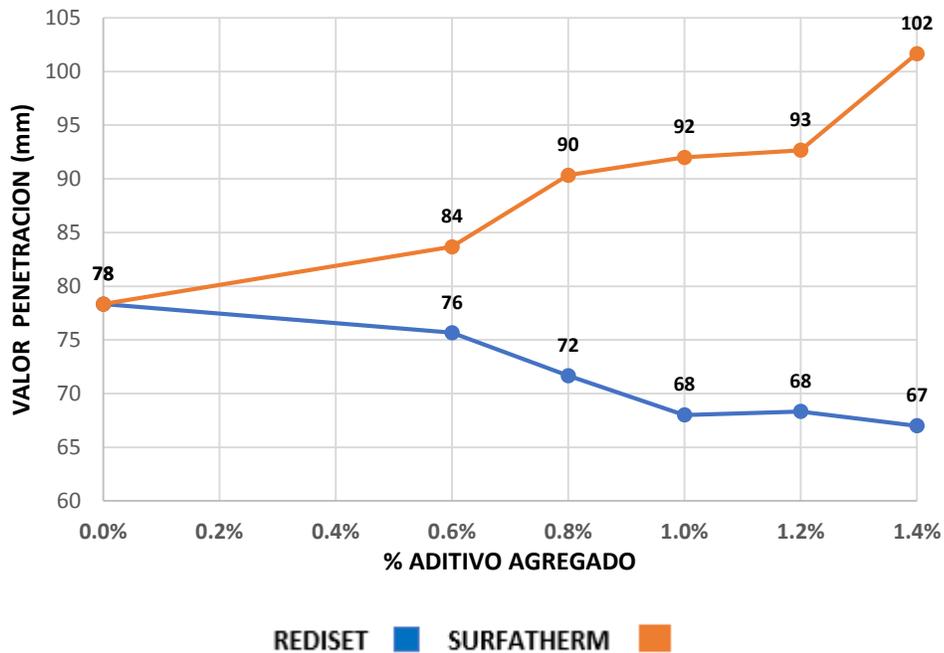
4.1.3. Resultados Prueba de penetración.

Al finalizar dicha prueba, se obtuvieron los siguientes resultados de punto de penetración para el asfalto **AC-20** ensayado:

AC-20 - Rediset = (77 a 67) mm

AC-20 - Surfatherm = (77 a 102) mm

Como se puede ver en la gráfica 5, el asfalto con rediset tiene un valor de penetración menor con 2 mm al 0.6% y así se mantiene reduciendo su penetración respecto al aumento de contenido de aditivo por lo que a la temperatura de la prueba a 25°C el asfalto se hace más duro. Por otra parte surfatherm por se comporta de manera contraria con un valor mayor 6 mm al 0.6% y aumenta su valor de penetración aumentando conforme se agrega mayor contenido del aditivo por lo que a la misma temperatura se vuelve más blando, cumpliendo con el parámetro mínimo de penetración de mínimo 60 mm.



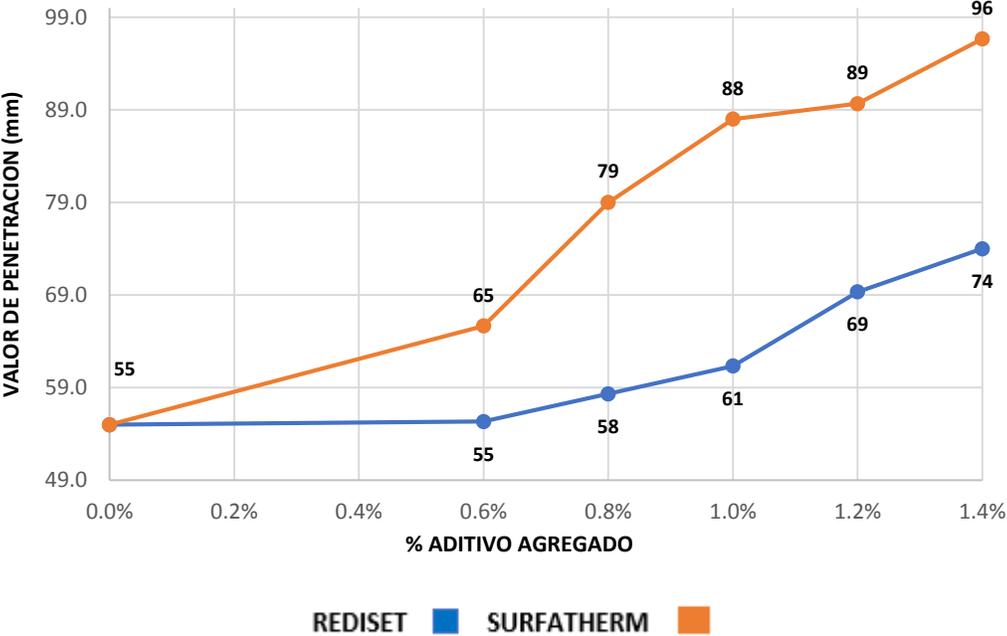
Gráfica 5. Punto de penetración (AC-20)

Para el **Asfalto AC-20 Modificado Tipo I**, se obtuvieron los siguientes rangos de penetración:

AC-20 Modificado Tipo I rediset = (55 a 74) mm

AC-20 Modificado Tipo I surfatherm = (55 a 96) mm

El asfalto modificado con ambos aditivos hace que aumente la penetración respecto a la muestra sin contenido, rediset mantiene el mismo valor a 0.6% y después aumenta gradualmente a mayor contenido de este hasta alcanzar 19 mm al 1.4%. El aditivo surfatherm sube el punto de penetración más rápido con 10 mm al 0.6% y continua hasta llegar a 41 mm al 1.4%, cumpliendo con el parámetro mínimo de penetración de 40 mm.



Gráfica 6. Punto de penetración (AC-20 MODIFICADO TIPO I)

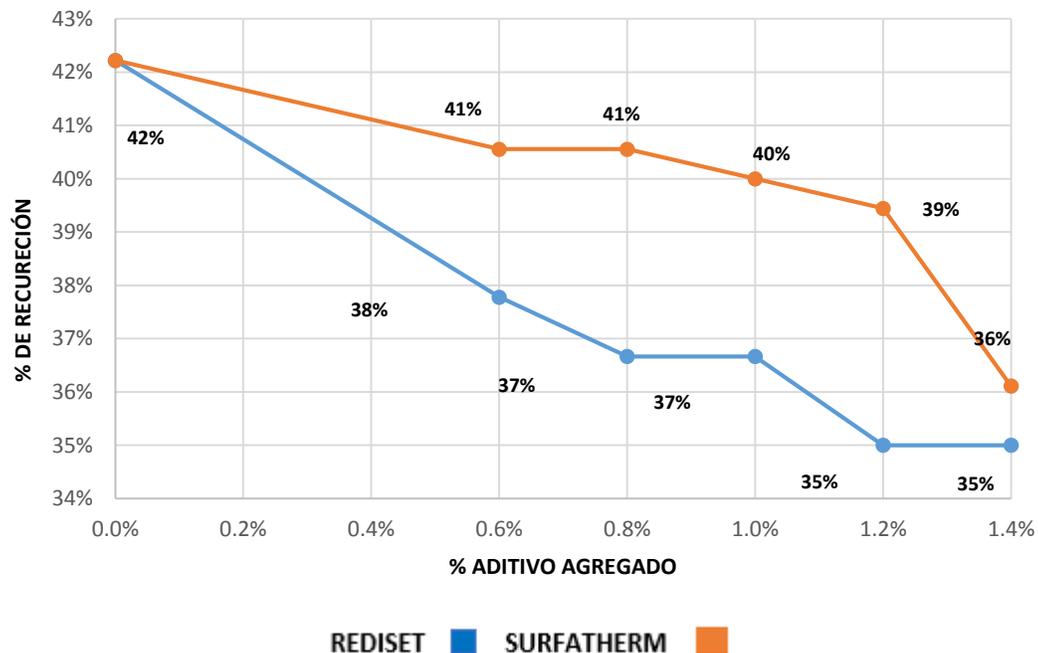
4.1.4. Resultados Recuperación elástica por torsión.

Concluida la prueba se obtuvieron los siguientes rangos de recuperación elástica para el asfalto **AC-20 Modificado Tipo I** ensayado:

AC-20 Modificado Tipo I - rediset) = (42 a 35) %

AC-20 Modificado Tipo I - surfatherm = (42 a 36) %

Como se representa en la gráfica 7, se presenta en la gráfica el asfalto modificado con ambos aditivos reducen la recuperación elástica respecto a la muestra sin contenido, sin embargo, las muestras con rediset tiene una menor recuperación elástica que el surfatherm, dado que a la temperatura de prueba a 25°C surfatherm se hace más blando y rediset se hace más duro llegando los últimos puntos al 1.2% y 1.4% de este al límite permitido, cumpliendo con el parámetro de recuperación elástica por torsión a un mínimo del 35%.



Gráfica 7. Recuperación elástica (AC-20 MODIFICADO TIPO I)

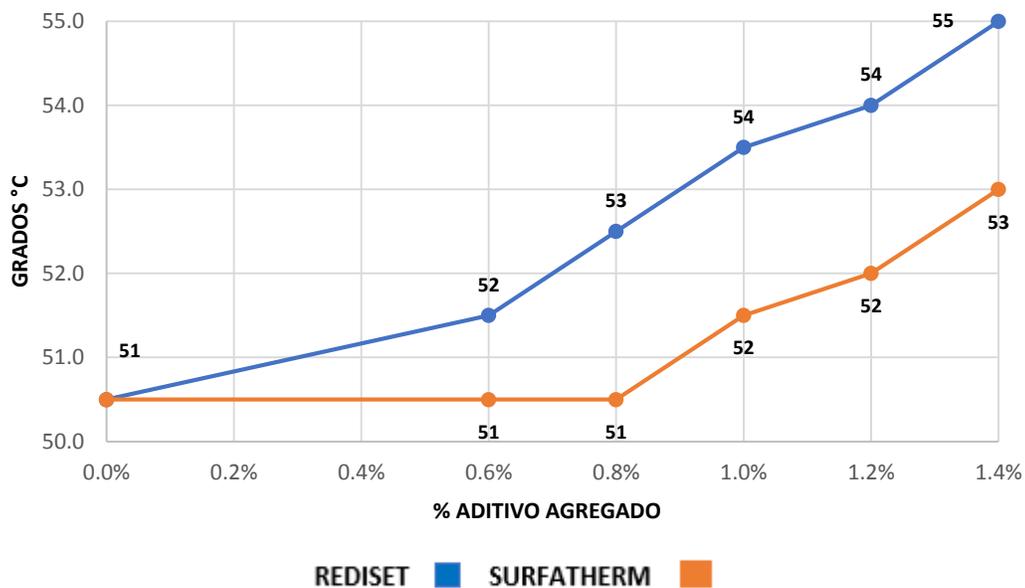
4.1.5. Resultados Punto de reblandecimiento.

Una vez terminada la prueba se obtuvieron los siguientes datos de punto de reblandecimiento para el asfalto **AC-20** ensayado:

AC-20 - rediset = (51 a 55) °C

AC-20 - surfatherm = (51 a 53) °C

Ambos aditivos agregados al asfalto suben ligeramente su punto de reblandecimiento, el asfalto con rediset tiene un aumento de 1°C desde el punto al 6.0% y se mantiene así gradualmente hasta llegar a 4°C más respecto a la muestra sin aditivo. Por otro lado surfatherm se mantiene con la misma temperatura al 0.6% y 0.8% y de igual manera aumenta 1°C para el resto de los puntos, cumpliendo con el parámetro de reblandecimiento de 48 a 56 °C.



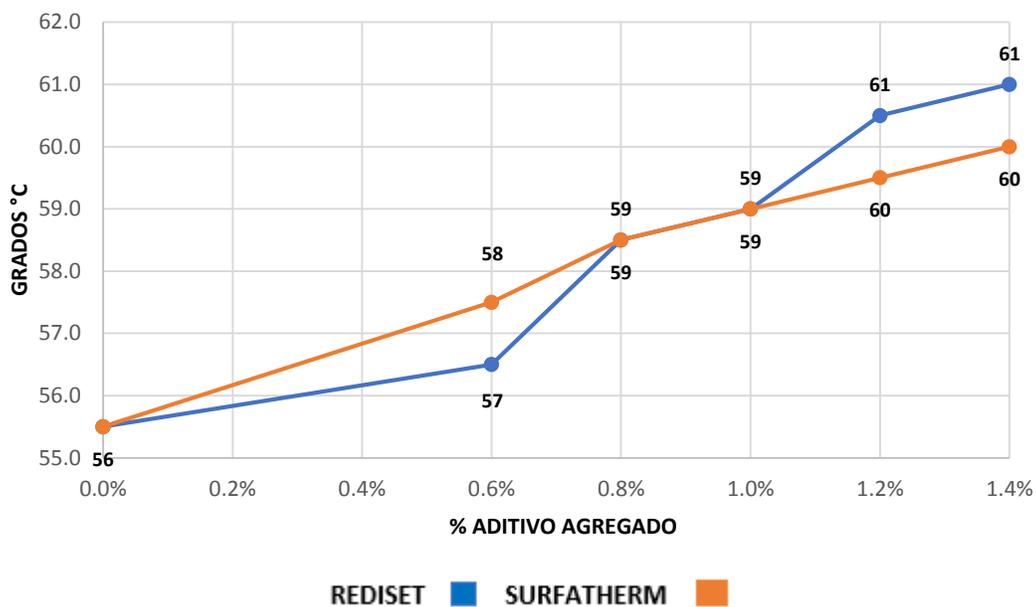
Gráfica 8. Punto de reblandecimiento (AC-20 MODIFICADO TIPO I)

Para **Asfalto AC-20 Modificado Tipo I**, obtuvieron los siguientes rangos de reblandecimiento.

AC-20 Modificado Tipo I - rediset = (56 a 61) °C

AC-20 Modificado Tipo I - surfatherm = (56 a 60) °C

Como se observa en la gráfica 9, el asfalto modificado con ambos aditivos hace que aumente el punto de reblandecimiento respecto a la muestra sin contenido, pero el comportamiento del rediset al 0.6% es menor que el de surfatherm. Los siguientes dos puntos al 0.8% y 1.0% alcanzan los mismos valores y finalmente los últimos dos puntos al 1.2% y 1.4% rediset aumenta 2°C y surfatherm 1°C, cumpliendo con el parámetro reblandecimiento de mínimo 55°C.



Gráfica 9. Punto de reblandecimiento (AC-20 MODIFICADO TIPO I)

4.2. Resultados de pruebas de calidad para agregados pétreos.

Como se muestra en la tabla 16, los resultados obtenidos de los materiales pétreos serán el promedio de cada una de las pruebas que se realizaron por triplicado tanto de grava como de arena.

Tabla 16. Resultados agregados pétreos

PRUEBAS		UNIDAD	No.1	No.2	No.3	PROMEDIO
GRAVA	DESGASTE DE LOS ÁNGELES	%	13.0	13.4	13.7	13
	MICRO-DEVAL	%	6.8	6.5	6.7	7
	FORMA DE LA PARTÍCULA	%	34	33	32	33
ARENA	AZUL DE METILENO	mL	14	13	15	14
	EQUIVALENTE DE ARENA	%	51	50	53	51

Los datos que se presentan en la tabla 17, son los valores mínimos y máximos de aceptación de calidad para materiales pétreos de una mezcla densa, donde cada resultado obtenido es comparado y aceptado para seguir con el diseño de la granulometría que compondrá la mezcla asfáltica de 3/4”.

Tabla 17. Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa

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_{pw}), mínimo	2.4	
Angularidad, %, mínimo	40	
Equivalente de arena; %, mínimo	45	
Azul de metileno, mg/g, máximo	18	

4.3. Resultados diseño de granulometría para mezcla densa 3/4"

a) Por lo que es necesario retomar los valores obtenidos de la prueba de granulometría de Materiales pétreos para mezclas asfálticas, en la tabla 18 se representan los porcentajes obtenidos inicialmente para trabajar la grava y arena.

Tabla 18. Porcentajes de retenido de material pétreo grava y arena

GRAVA 1/4		56%	
MALLA	TAMAÑO (mm)	%RETENIDO	% PASA
3/4	19	0	56.0
1/2	12.5	74	41.4
3/8	9.5	45	25.2
1/4	6.4	15	8.4
4	4.75	4	2.2

ARENA 3/8		44%	
MALLA	TAMAÑO (mm)	%RETENIDO	% PASA
3/4	19	0	44.0
1/2	12.5	0	44.0
3/8	9.5	0	44.0
1/4	6.4	99	43.6
4	4.75	91	40.0
10	2	53	23.3
20	0.85	33	14.5
40	0.425	23	10.1
60	0.25	18	7.9
100	0.15	14	6.2
200	0.075	10	4.4

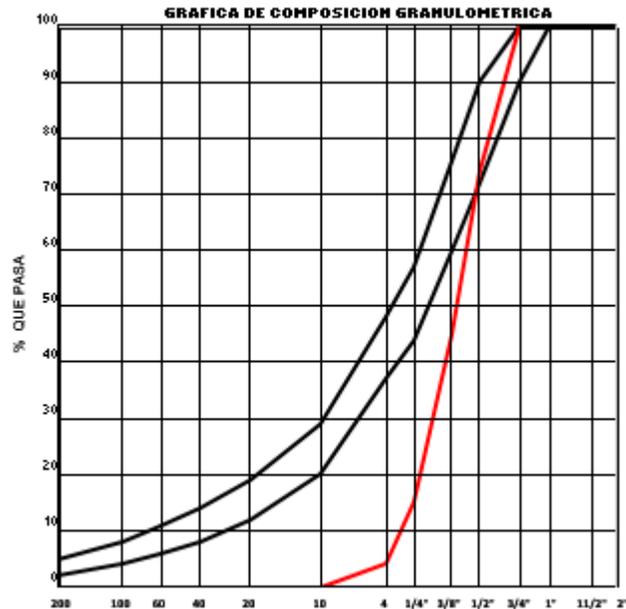
Para esto se tomarán los parámetros de grava y arena como lo marca la normativa SCT, para cumplir los requisitos de una granulometría de 3/4" del material esto para cada tamaño de malla como se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezcla asfáltica densa

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (%)	12,5 (%)	19 (%)	25 (1)	37,5 (1½)
		Porcentaje que pasa				
50	2"	---	---	---	---	100
37,5	1½"	---	---	---	100	90 - 100
25	1"	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	¾"	---	100	90 - 100	79 - 90	62 - 79
12,5	½"	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9,5	¾"	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
6,3	½"	70 - 81	56 - 69	44 - 57	36 - 46	30 - 39
4,75	N°4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 34
2	N°10	28 - 42	25 - 35	20 - 29	17 - 24	13 - 21
0,85	N°20	18 - 27	15 - 22	12 - 19	9 - 16	6 - 13
0,425	N°40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0,25	N°60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0,15	N°100	6 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0,075	N°200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

Como se puede ver en la gráfica 10 la línea roja representa los porcentajes de grava de 3/4" de las cuales las partículas son muy gruesas, por lo que no están dentro de los parámetros de calidad marcados con líneas negras límite mínimo – máximo.

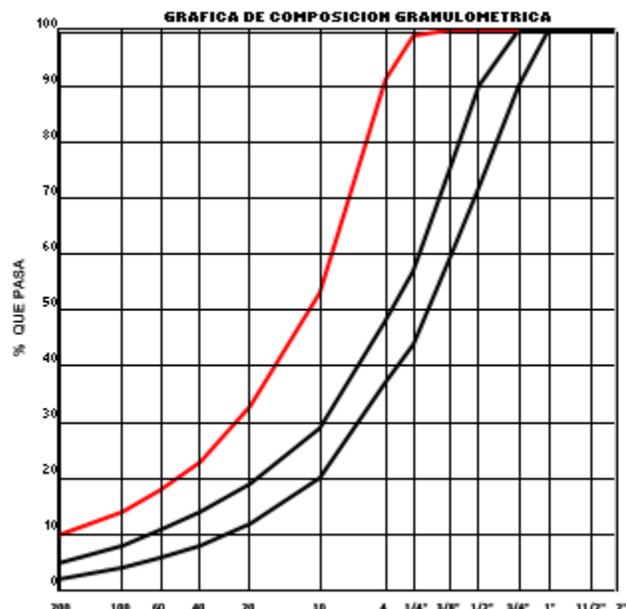
COMPOSICION GRANULOMETRICA	MALLAS	% QUE PASA	DEL PROYECTO
	Nùr 2"		
	Nùr 1 1/2"		
	Nùr 1"		
	Nùr 3/4	100	90-100
	Nùr 1/2	74	72-90
	Nùr 3/8	45	60-76
	Nùr 1/4	15	44-57
	Nùr 4	4	37-48
	Nùr 10	0	20-29
	Nùr 20	0	12-19
	Nùr 40	0	8-14
	Nùr 60	0	6-11
Nùr 100	0	4-8	
Nùr 200	0	2-5	



Gráfica 10. Porcentajes de grava

De la misma manera pasa con la arena de 3/8" como se observa en la gráfica 11 los porcentajes de arena de las cuales las partículas son muy finas, por lo que no están dentro de los parámetros de calidad marcados con líneas negras límite mínimo – máximo

COMPOSICION GRANULOMETRICA	MALLAS	% QUE PASA	DEL PROYECTO
	Nùr 2"		
	Nùr 1 1/2"		
	Nùr 1"		
	Nùr 3/4	100	90-100
	Nùr 1/2	100	72-90
	Nùr 3/8	100	60-76
	Nùr 1/4	99	44-57
	Nùr 4	91	37-48
	Nùr 10	53	20-29
	Nùr 20	33	12-19
	Nùr 40	23	8-14
	Nùr 60	18	6-11
Nùr 100	14	4-8	
Nùr 200	10	2-5	



Gráfica 11. Porcentajes de arena

De tal manera que se complementaran ambos materiales para que se logre entrar dentro de dichos parámetros de la siguiente manera.

b) El porcentaje de los materiales pétreos que se empleará para la mezcla asfáltica densa de 3/4" será de:

Porcentaje total 100% - 56% de grava - 44% de arena

Peso total 1,100 k/g - 616 k/g de grava - 484 k/g de arena

Como se representa en tabla 20, se procede a calcular el peso del retenido y porcentaje de material que pasa por cada una de las mallas.

Tabla 20. Porcentajes para realizar los especímenes muestra

		Wtotal= (g) 1100	ΣW= (g) 616	GRAVA=% 56
MALLA	TAMAÑO (mm)	W RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
3/4	19	0	0	56.0
1/2	12.5	160.2	14.6	41.4
3/8	9.5	178.6	16.2	25.2
1/4	6.4	184.8	16.8	8.4
4	4.75	67.8	6.2	2.2
PASA 4		24.6	2.2	
TOTAL=		616 (g)	56 (%)	

		Wtotal= (g) 1100	ΣW= (g) 484	ARENA=% 44
MALLA	TAMAÑO (mm)	W RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
3/4	19	0	0	44.0
1/2	12.5	0	0	44.0
3/8	9.5	0	0	44.0
1/4	6.4	4.8	0.4	43.6
4	4.75	38.7	3.5	40.0
10	2	183.9	16.7	23.3
20	0.85	96.8	8.8	14.5
40	0.425	48.4	4.4	10.1
60	0.25	24.2	2.2	7.9
100	0.15	19.4	1.8	6.2
200	0.075	19.4	1.8	4.4
PASA 200		48.4	4.4	
TOTAL=		484 (g)	44 (%)	

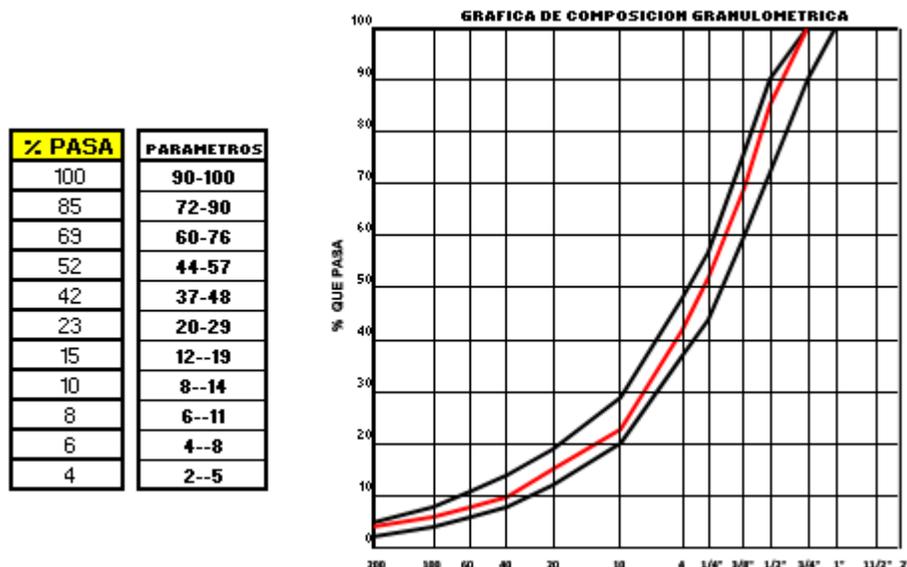
La composición de la granulometría final quedara de la siguiente manera como se ve en la tabla 21, sumando el porcentaje que pasa de cada malla de grava y arena de manera inversa sacar el porcentaje de retenido y los pesos para realizar los especímenes.

Tabla 21. Composición de granulometría final

Vtotal= (g)		GRAVA=	56	%
1100		ARENA=	44	%
		TOTAL=	100	%

MALLA	TAMAÑO (mm)	V RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
3/4	19	0	0	100
1/2	12.5	160.2	14.6	85
3/8	9.5	178.6	16.2	69
1/4	6.4	189.6	17.2	52
4	4.75	106.5	9.7	42
10	2	208.6	19.0	23
20	0.85	96.8	8.8	15
40	0.425	48.4	4.4	10
60	0.25	24.2	2.2	8
100	0.15	19.4	1.8	6
200	0.075	19.4	1.8	4
PASA 200		48.4	4.4	
TOTAL=		1100	100	
		(g)	(%)	

De tal manera que la composición de la granulometría final como se aprecia en la gráfica 12, para trabajar se encuentra dentro de los parámetros de calidad y cumple para una mezcla asfáltica densa de 3/4".



Gráfica 12. Composición de granulometría final

4.4 Resultados pruebas de calidad para mezcla asfáltica

Al finalizar las pruebas para mezcla asfáltica se procede a comparar los resultados obtenidos de vacíos de aire, vacíos en agregado mineral, estabilidad, flujo y peso específico para cada una de las gráficas con la tabla 14 y 15, que contienen los requisitos de calidad mediante el método Marshall.

4.4.1 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 (MAD)

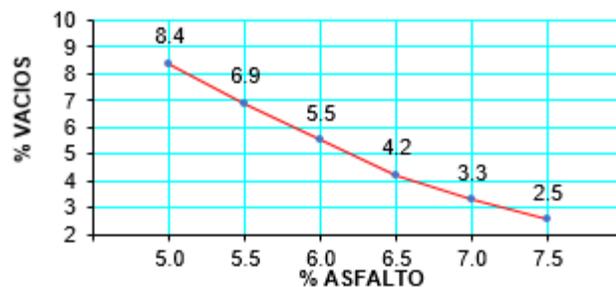
A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los primeros especímenes ensayados en la tabla 22, con asfalto **AC-20**.

Tabla 22. Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas AC-20 (MAD)

CARACTERISTICAS	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES
VACIOS (%)	4.2	3 a 5
V.A.M (%)	17.52	14 MIN
ESTABILIDAD (Kg)	1105	816 MIN
FLUJO (mm)	3.27	2 a 3.5
PESO ESPECIFICO (Kg/m ³)	2259	-

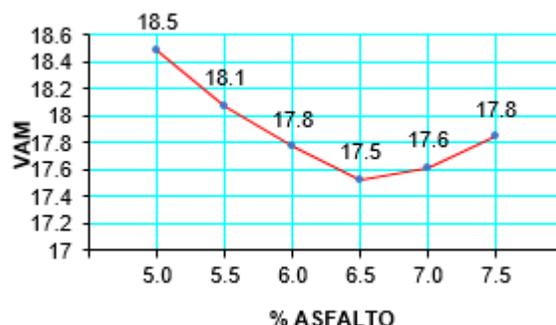
Especimen compactado con 75 golpes del pisón por cara a la temperatura de 160 °C

Como se aprecia en la gráfica 13, los especímenes se comportan de la siguiente manera donde el valor de vacíos de aire que están dentro del rango permitido de 3 a 5% son los puntos al 6.5, 7.0 y 7.5% de contenido de asfalto respecto a la mezcla de tal manera que los puntos al 5.0, 5.5 y 6.0% quedan descartados.



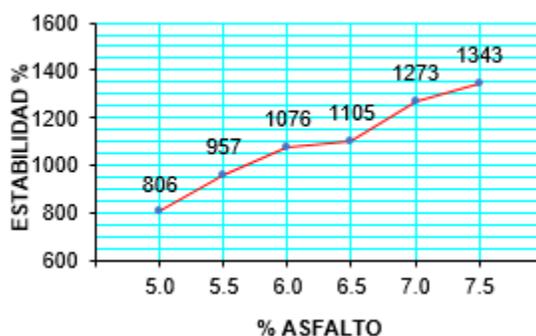
Gráfica 13. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MAD)

Los resultados para esta prueba se muestran de la siguiente manera como se observa en la gráfica 14, donde el valor de vacíos del agregado mineral (V.A.M) para los puntos al 6.5, 7.0 y 7.5% se encuentran dentro del rango mínimo permitido de 14% por lo que pasan a la prueba siguiente.



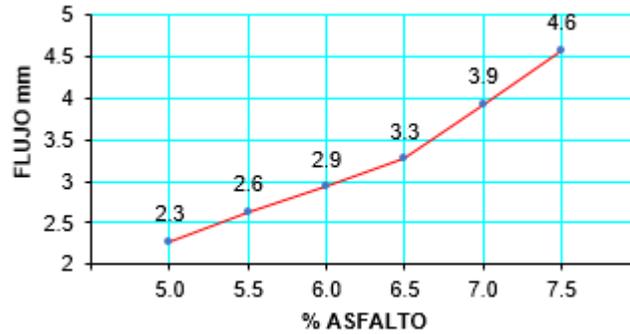
Gráfica 14. Resultados de vacíos de agregado mineral (MAD)

Como se ve en la gráfica 15, el valor de estabilidad de los puntos al 6.5, 7.0 y 7.5% se encuentra dentro del parámetro mínimo de 816 kg permitido por lo que pasan a la siguiente prueba para su dictamen final.



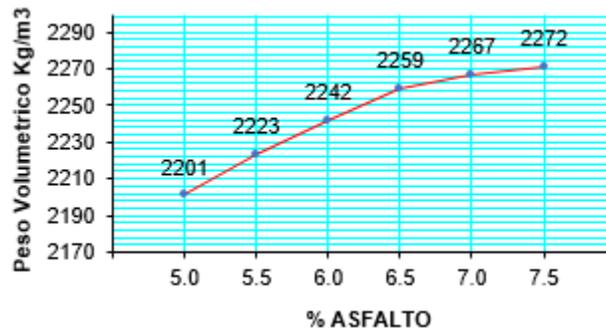
Gráfica 15. Resultados de estabilidad (MAD)

Los especímenes se comportan de la siguiente manera como se observa en la gráfica 16, donde el valor del flujo al 7.0 y 7.5% quedan fuera del parámetro requerido de 2 a 3.5 mm por otro lado, el punto al 6.5% está dentro del rango y es el punto óptimo para utilizar.



Gráfica 16. Resultados de flujo (MAD)

Por último, el peso volumétrico de la mezcla final para dicho punto elegido se representa en la gráfica 17, como resultado de estos primeros especímenes ensayados se encuentra que el punto al 6.5% de contenido de asfalto **AC-20** respecto a la mezcla final es el que mejor se comporta por lo que este será el óptimo para las siguientes muestras a ensayar y determinar ahora el contenido óptimo de aditivo a agregar.



Gráfica 17. Resultados de peso volumétrico (MAD)

4.4.2 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 con rediset wmx-8017a (MAD-AR-Templada)

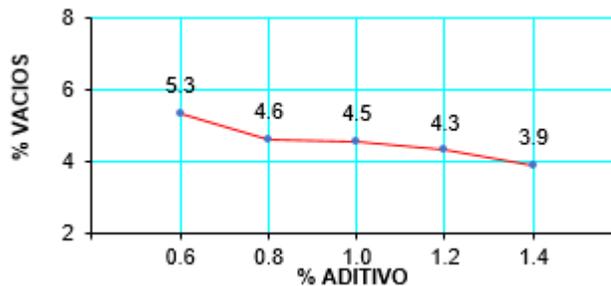
Los resultados obtenidos de los segundos especímenes ensayados en la tabla 23, con un contenido de asfalto del 6.5% a trabajar de **AC-20** pero ahora agregando aditivo **rediset** a distintas proporciones para definir la mezcla templada final.

Tabla 23. Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas (MAD-AR-Templada)

CARACTERISTICAS	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES
VACIOS (%)	4.62	3 a 5
V.A.M (%)	17.89	14 MIN
ESTABILIDAD (Kg)	1010	816 MIN
FLUJO (mm)	3.47	2 a 3.5
PESO ESPECIFICO (Kg/m3)	2249	-

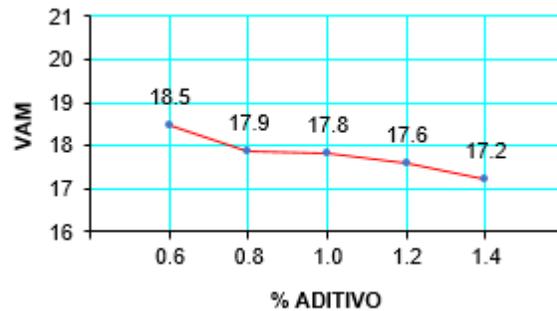
Especímen compactado con 75 golpes del pisón por cara a la temperatura de 130 °C

Como se aprecia en la gráfica 18, los especímenes se comportan de la siguiente manera donde el punto al 0.6% de contenido de aditivo en la mezcla queda fuera ya que no cumple con el porcentaje de los vacíos de aire de 3 a 5% y de esta manera siguen adelante los puntos al 0.8%, 1.0%, 1.2% y 1.4% que si cumplen con el parámetro.



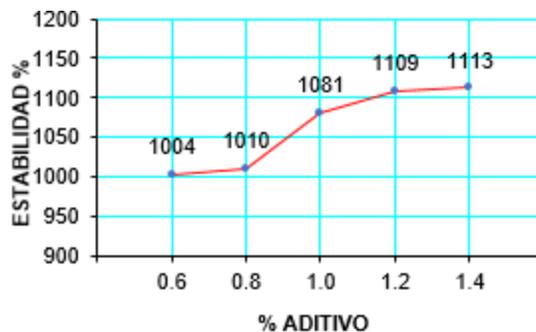
Gráfica 18. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MAD-AR-Templada)

El resultado de los especímenes se comporta de la siguiente manera como se observa en la gráfica 19, donde los puntos al 0.8%, 1.0%, 1.2% y 1.4% están dentro del valor de vacíos del agregado mineral (V.A.M) mínimo de 14% pasando a la siguiente prueba.



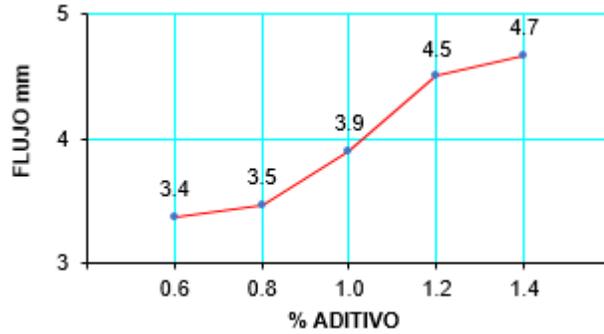
Gráfica 19. Resultados de vacíos de agregado mineral (MAD-AR-Templada)

Como se ve en la gráfica 20, los puntos al 0.8%, 1.0%, 1.2% y 1.4% los valores de estabilidad se encuentran dentro del mínimo de 816 kg permitido por lo que pasan a la siguiente prueba para el dictamen final.



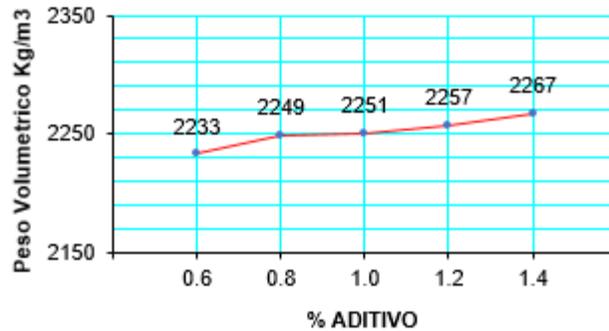
Gráfica 20. Resultados de estabilidad (MAD-AR-Templada)

Los especímenes se comportan de la siguiente manera como se muestra en la gráfica 21, donde los puntos al 1.0 1.2 y 1.4% de aditivo agregado quedan fuera ya que no cumplen con el valor máximo del flujo requerido de 3.5 mm para la mezcla final, por lo que el punto al 0.8% de aditivo será el óptimo a utilizar.



Gráfica 21. Resultados de flujo (MAD-AR-Templada)

Por último, el peso volumétrico de la mezcla final se representa en la gráfica 22, como resultado de estos segundos especímenes ensayados se encuentra que el punto al 0.8% de **rediset** agregado en el asfalto **AC-20** será el contenido óptimo para esta mezcla asfáltica templada.



Gráfica 22. Resultados de peso volumétrico (MAD-AR-Templada)

4.4.3 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 con surfatherm (MAD-AS-Templada)

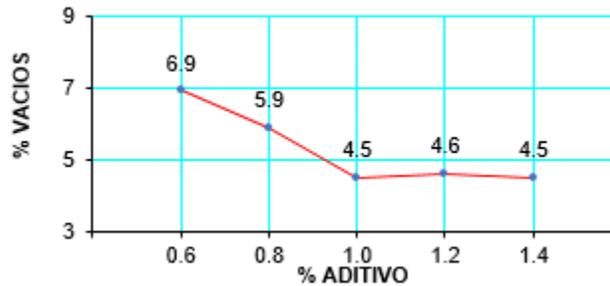
Los resultados siguientes en la tabla 24, son obtenidos de los terceros especímenes ensayados con asfalto **AC-20** con un contenido de asfalto del 6.5% ahora incorporando aditivo **surfatherm** a distintas proporciones para definir la mezcla templada.

Tabla 24. Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas (MAD-AS-Templada)

CARACTERISTICAS	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES
VACIOS (%)	4.47	3 a 5
V.A.M (%)	17.76	14 MIN
ESTABILIDAD (Kg)	904	816 MIN
FLUJO (mm)	3.43	2 a 3.5
PESO ESPECIFICO (Kg/m ³)	2253	-

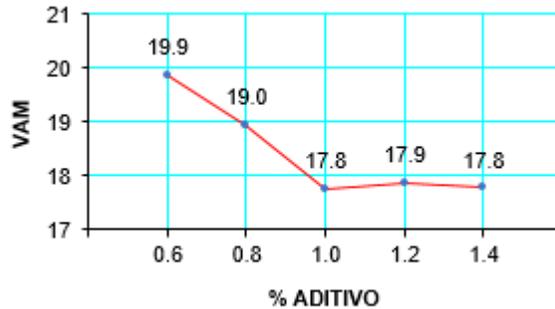
Especímen compactado con 75 golpes del pisón por cara a la temperatura de 130 °C

Como se aprecia en la gráfica 23, los especímenes se comportan de la siguiente manera donde los puntos al 0.6 y 0.8% de contenido de aditivo en la mezcla queda fuera ya que no cumple con el 5% máximo de vacíos de aire, por lo que los puntos al 1.0, 1.2 y 1.4% siguen adelante al estar dentro del parámetro.



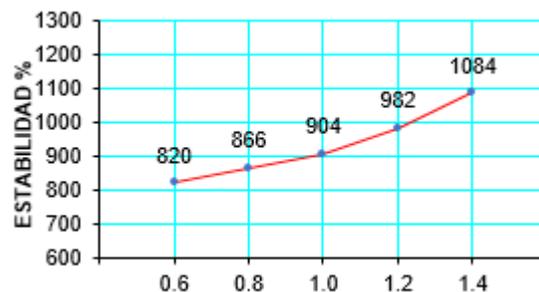
Gráfica 23. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MAD-AS-Templada)

De los especímenes ensayados se obtuvieron los resultados siguientes representados en la gráfica 24, para los puntos restantes al 1.0, 1.2 y 1.4% que están dentro del rango de vacíos del agregado mineral pasando a la siguiente prueba para su dictamen.



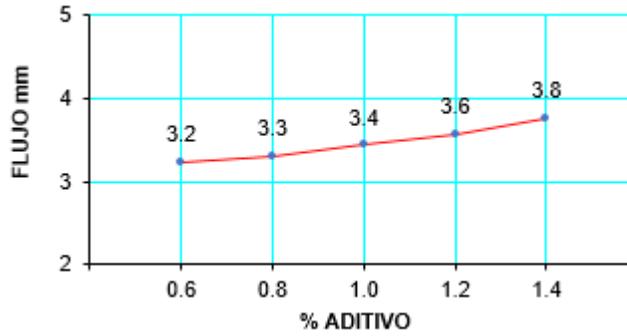
Gráfica 24. Resultados de vacíos de agregado mineral (MAD-AS-Templada)

De igual manera los valores de estabilidad mostrados en la gráfica 25, los especímenes están dentro del mínimo de 816 kg, de esta manera aun no se descartan por lo que pasan a la siguiente prueba.



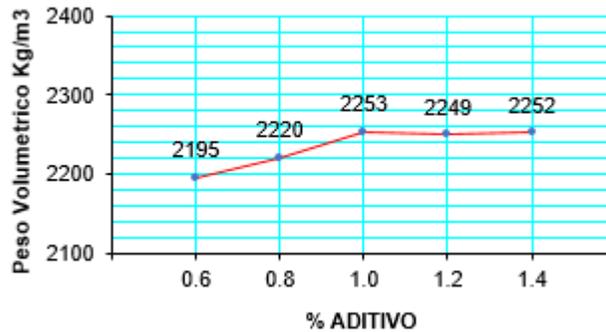
Gráfica 25. Resultados de estabilidad (MAD-AS-Templada)

Como se muestra en la gráfica 26, los resultados se comportan de la siguiente manera donde los puntos al 1.2 y 1.4% de aditivo agregado quedan fuera ya que no cumplen con el valor máximo de flujo a 3.5 mm requerido para la mezcla final, por lo que finalmente el punto al 1.0% de aditivo será el elegido.



Gráfica 26. Resultados de flujo (MAD-AS-Templada)

El peso volumétrico de la mezcla final para dicho punto elegido se representa en la gráfica 27, como resultado de los especímenes nos podemos apreciar que el punto de 1.0% de **surfatherm** agregado en el asfalto **AC-20** es el contenido óptimo para la mezcla asfáltica templada.



Gráfica 27. Resultados de peso volumétrico (MAD-AS-Templada)

4.4.4 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 Modificado Tipo I (MADM-Tipo-I)

Al término de las pruebas para mezcla asfáltica se procede a comparar los resultados obtenidos de vacíos de aire, vacíos en agregado mineral, estabilidad, flujo y peso específico para cada una de las gráficas con la tabla 14 y 15, que contienen los requisitos de calidad mediante el método Marshall.

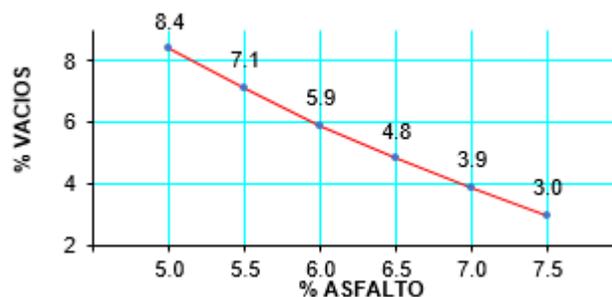
Los resultados obtenidos de los cuartos especímenes ensayados como se observan en la tabla 25, serán de igual manera para definir el contenido óptimo de asfalto, pero ahora con asfalto **AC-20 Modificado Tipo I**.

Tabla 25.- Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas (MADM-Tipo-I)

CARACTERISTICAS	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES
VACIOS (%)	4.8	3 a 5
V.A.M (%)	18.1	14 MIN
ESTABILIDAD (Kg)	1365	816 MIN
FLUJO (mm)	3.3	2 a 3.5
PESO ESPECIFICO (Kg/m ³)	2254	-

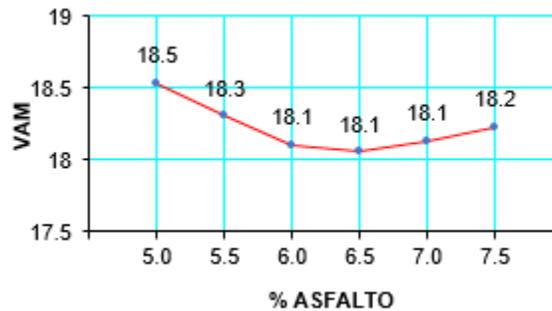
Especímen compactado con 75 golpes del pisón por cara a la temperatura de 160 °C

Los resultados de contenido de vacíos de aire se ven en la gráfica 28 donde los puntos al 5.0, 5.5 y 6.0% de contenido de asfalto respecto a la mezcla se descartan ya que no cumplen con el máximo de un 5%, así que los puntos al 6.5, 7.0 y 7.5% siguen adelante.



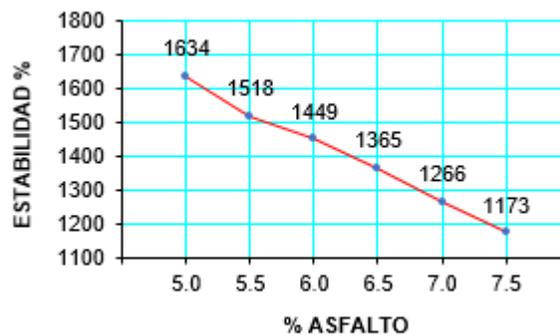
Gráfica 28. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MADM-Tipo-I)

En la gráfica 29, las muestras se comportan de la siguiente manera donde el valor de vacíos del agregado mineral al 6.5, 7.0 y 7.5% se encuentran por encima del mínimo de 14% permitido por lo que pasan a la siguiente prueba.



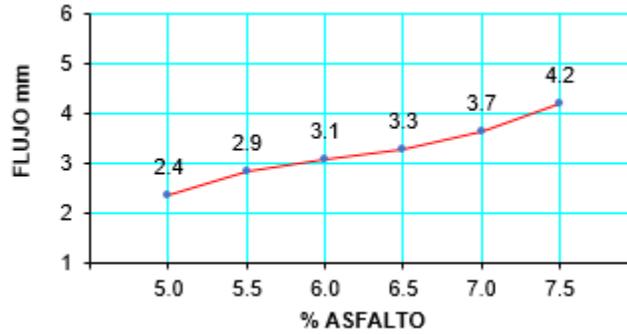
Gráfica 29. Resultados de vacíos de agregado mineral (MADM-Tipo-I)

Los resultados de estabilidad representados en la gráfica 30 nos muestra que los puntos al 6.5, 7.0 y 7.5% se encuentra dentro del valor mínimo permitido de 816 kg por lo que pasan a la siguiente prueba para su dictamen final.



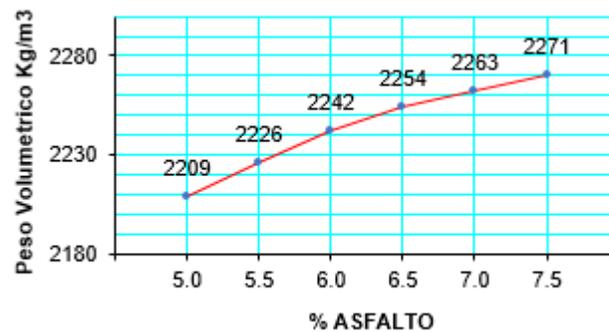
Gráfica 30. Resultados de estabilidad (MADM-Tipo-I)

Como se observa en la gráfica 31, los especímenes restantes se comportan de la siguiente manera donde los puntos al 7.0 y 7.5% quedan fuera del valor mínimo de 3 mm, por otro lado, el punto al 6.5% se elige ya que está dentro del rango.



Gráfica 31. Resultados de flujo (MADM-Tipo-I)

Por último, el peso volumétrico de la mezcla final para dicho punto elegido se ve muestra en la gráfica 32 como resultado de estos especímenes el punto de 6.5% de asfalto **AC-20 Modificado Tipo I** respecto a la mezcla final es el que cumple con los parámetros por lo que este será el óptimo para las siguientes muestras a ensayar y determinar ahora el contenido óptimo de aditivo a agregar.



Gráfica 32. Resultados de peso volumétrico (MADM-Tipo-I)

4.4.5 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 Modificado Tipo I con rediset wmx-8017a (MADM-Tipo-I-AR-Templada)

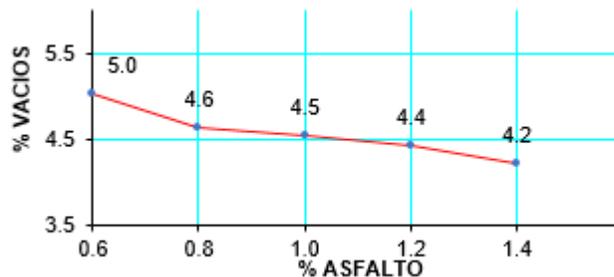
De la siguiente manera se muestran los resultados obtenidos de los quintos especímenes ensayados en la tabla 26, con asfalto **AC-20 Modificado Tipo I**, con un contenido de asfalto del 6.5% y ahora incorporando aditivo **rediset** a distintas proporciones para definir la mezcla templada.

Tabla 26.- Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas (MADM-Tipo-I-AR-Templada)

CARACTERISTICAS	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES
VACIOS (%)	4.63	3 a 5
V.A.M (%)	17.9	14 MIN
ESTABILIDAD (Kg)	1173	816 MIN
FLUJO (mm)	3.2	2 a 3.5
PESO ESPECIFICO (Kg/m3)	2258	-

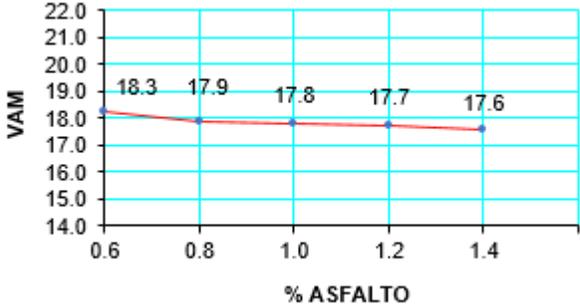
Espécimen compactado con 75 golpes del pisón por cara a la temperatura de 130 °C

Como se aprecia en la gráfica 33, los resultados de contenido de vacíos para este caso todos los puntos de aditivo en tan dentro del rango de 3 a 5% de manera que siguen adelante con las demás pruebas de calidad para descartar los puntos que no cumplan con los requisitos.



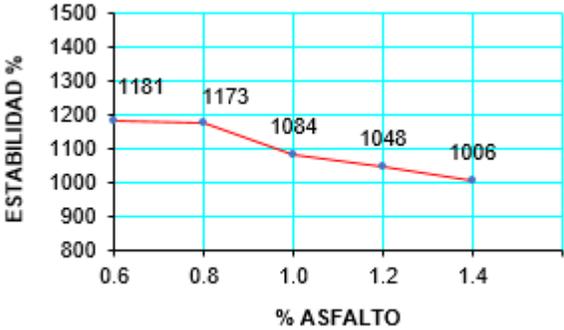
Gráfica 33. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MADM-Tipo-I-AR-Templada)

En la gráfica 34 los especímenes se comportan de la siguiente manera donde los puntos están dentro del valor mínimo de vacíos del agregado mineral de 14% pasando a la siguiente prueba.



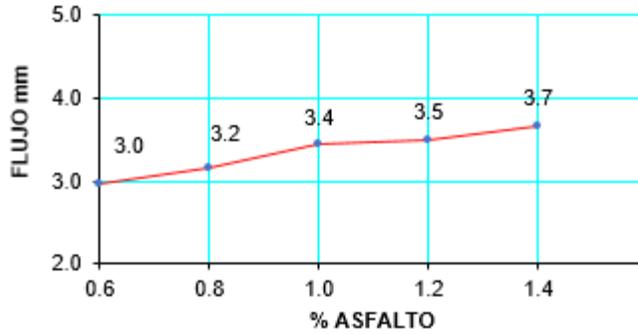
Gráfica 34. Resultados de vacíos de agregado mineral (MADM-Tipo-I-AR-Templada)

Los valores de estabilidad de la mezcla se encuentran dentro del mínimo de 816 kg por lo que pasan a la siguiente prueba para su dictamen final.



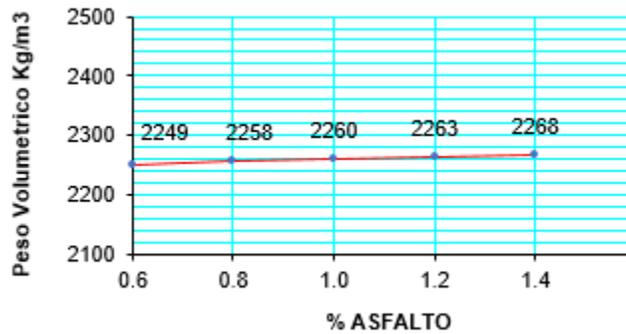
Gráfica 35. Resultados de estabilidad (MADM-Tipo-I-AR-Templada)

Como se muestra en la gráfica 36, los resultados obtenidos se comportan de la siguiente manera donde el punto al 1.4% este fuera del límite de flujo de 5 mm, aquí se tomará la decisión en cuestión de la cantidad de aditivo utilizado en los puntos restantes por lo que se tomará el segundo punto al 0.8% a razón de costo beneficio que cumplirá las propiedades necesarias de trabajo en la mezcla final.



Gráfica 36. Resultados de flujo (MADM-Tipo-I-AR-Templada)

Por último, el peso volumétrico de la mezcla final para dicho punto elegido se representa en la gráfica 37, como resultado de los especímenes el punto al 0.8% de **rediset** agregado en el asfalto **AC-20 Modificado Tipo I** respecto a la mezcla final será el óptimo para esta mezcla asfáltica templada.



Gráfica 37. Resultados de peso volumétrico (MADM-Tipo-I-AR-Templada)

4.4.6 Resultados de mezcla asfáltica AC-20 Modificado Tipo I con surfatherm (MADM-Tipo-I-AS-Templada)

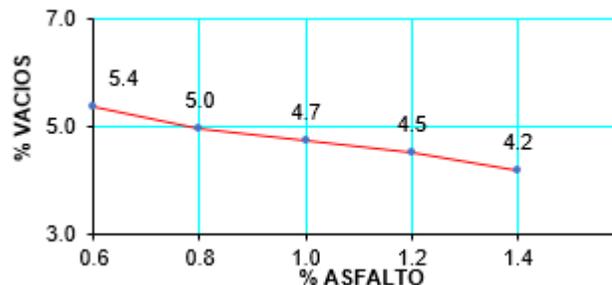
Posteriormente se muestran los resultados obtenidos de los sextos especímenes ensayados en la tabla 27, con asfalto **AC-20 Modificado Tipo I** con un contenido de asfalto del 6.5% ahora incorporando aditivo **surfatherm** a distintas proporciones para definir la mezcla templada.

Tabla 27.- Resultados de muestras ensayadas y valores de especificaciones permitidas (MADM-Tipo-I-AS-Templada)

CARACTERISTICAS	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES
VACIOS (%)	4.8	3 a 5
V.A.M (%)	18.0	14 MIN
ESTABILIDAD (Kg)	978	816 MIN
FLUJO (mm)	3.3	2 a 3.5
PESO ESPECIFICO (Kg/m3)	2256	-

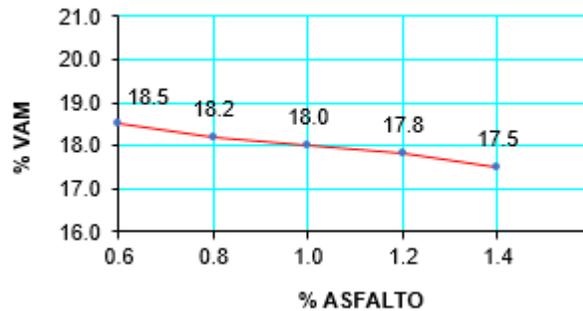
Especímen compactado con 75 golpes del pisón por cara a la temperatura de 130 °C

Como se aprecia en la gráfica 38, los valores obtenidos se comportan de la siguiente manera donde el punto al 0.6% de contenido de aditivo en la mezcla queda fuera ya que no cumple con los vacíos de aire mínimo del 5% y siguen adelante los puntos al 0.8, 1.0, 1.2 y 1.4% que si cumplen con el parámetro.



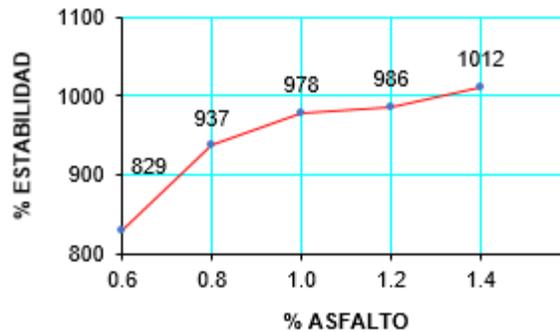
Gráfica 38. Resultados de vacíos contenidos en la mezcla (MADM-Tipo-I-AS-Templada)

En la gráfica 39, los especímenes se comportan de la siguiente manera donde los puntos restantes al 1.8, 1.0, 1.2 y 1.4% están dentro del valor mínimo de vacíos de agregado mineral del 14% pasando a la siguiente prueba.



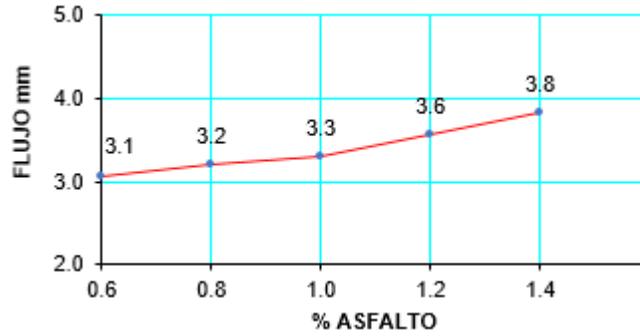
Gráfica 39. Resultados de vacíos de agregado mineral (MADM-Tipo-I-AS-Templada)

Como se ve en la gráfica 40, de la misma manera los resultados obtenidos de estabilidad de los especímenes se encuentran dentro del mínimo permitido de 816 kg por lo que pasan a la siguiente prueba para su dictamen final.



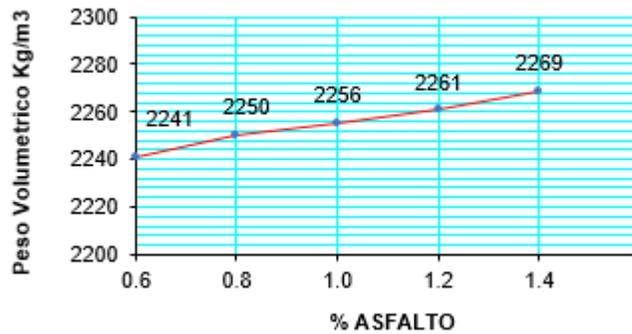
Gráfica 40. Resultados de estabilidad (MADM-Tipo-I-AS-Templada)

Los especímenes ensayados se comportan de la siguiente manera mostrada en la gráfica 41, donde los puntos al 1.2 y 1.4% están fuera del límite de 3.5 mm de igual manera se tomará la decisión en cuestión de la cantidad de aditivo utilizado en los puntos restantes por lo que se tomará el segundo punto al 0.8% a razón de costo beneficio que cumplirá las propiedades necesarias de trabajo en la mezcla final.



Gráfica 41. Resultados de flujo (MADM-Tipo-I-AS-Templada)

El peso volumétrico de la mezcla final para dicho punto elegido se ve en la gráfica 42, como resultado de estos especímenes ensayados el punto al 8.0% de **surfatherm** contenido en el asfalto **AC-20** respecto a la mezcla final es el contenido óptimo para la mezcla asfáltica templada.



Gráfica 42. Resultados de peso volumétrico (MADM-Tipo-I-AS-Templada)

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

Finalmente, después de las pruebas de calidad realizadas a los especímenes con aditivos surfactantes se obtiene un resultado donde rediset agregado al asfalto **AC-20** es del 0.8% respecto a la mezcla y por otro lado el aditivo surfatherm es del 1.0% donde cumplirán los requisitos necesarios para su puesta en obra. En el caso del asfalto **AC-20 Modificado Tipo I** el contenido optimo a utilizar es del 0.8% tanto para el aditivo rediset y Surfatherm.

En el transcurso de las pruebas realizadas con los asfaltos a medida que se incorporaban los aditivos fue de gran importancia ya que se pudo notar un cambio a razón del porcentaje que se agregaba por un lado pudieron ser trabajados de mejor manera en su manejo a la hora de ser ensayados y por otro lado notar como cambian las propiedades mecánicas de dichos materiales en los resultados de cada prueba tanto del asfalto y la mezcla final con la incorporación de los agregados pétreos.

Al momento de trabajar el aditivo rediset al estar de manera solida en forma de pequeñas pastillas su manejo fue mejor al incorporarlo en el asfalto, en cuanto a surfatherm al estar de forma líquida al momento de agregarlo al asfalto caliente para poder ser manipulado este desprende un olor fuerte también se puede llegar a tener perdidas de este material si no se tiene el cuidado adecuado en su manejo.

El diseño final de estas mezclas templadas de tamaño nominal de 3/4" permitió obtener una forma de trabajo para ser fabricada y conocer el resultado final de la mezcla asfáltica conseguida a menor temperatura y que minimice aspectos al momento de su fabricación y aplicación, respecto de las mezclas asfálticas convencionales en caliente que se utilizan de esta forma obtener un ahorro en los combustibles utilizados para su producción de esta manera se logra tener un producto que cumple con los requisitos de calidad.

5.2 Referencias

- [1] HAC Colocaciones SRL, Historia del asfalto [Online]. Available: <http://www.haccolocaciones.com/?pag=historia-asfalto>.
- [2] Susana Méndez Olvera, "Control de calidad de las mezclas asfálticas calientes y templadas", Tesis, Instituto Politécnico Nacional, ESIA Zacatenco, Ciudad de México, 2013.
- [3] Jacinto Luis García Santiago, Ana Izaga Martínez, Antonio Álvarez Gumiel "Introducción a las mezclas templadas" Mezclas templadas con emulsión bituminosa Vol. 1, pp. 6-28, Abril 2014.
- [4] Gestión de infraestructuras de Andalucía S.A, "Mezclas templadas para la construcción de firmes de carreteras", EIFFAGE infraestructuras, Sevilla España, 2008.
- [5] Lucia Miranda Pérez, "Tipos de mezclas asfáltica" Mezclas Asfálticas Templadas y Semicalientes, Zaragoza, 2012.
- [6] N-CTM-4-05-003/02, "Calidad de mezclas asfálticas para carreteras", Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capitulo 003 CMT Características de los materiales, 2002.
- [7] N-CTM-4-04/08, "Materiales pétreos para mezclas asfálticas", Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capitulo 4, CMT Características de los materiales, 2008.
- [8] N-CTM-4-05-001/06, "Calidad de materiales asfálticos", Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capitulo 001 CMT Características de los materiales, 2006.
- [9] N-CTM-4-05-002/06, "Calidad de materiales asfálticos modificados", Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capitulo 002 CMT Características de los materiales, 2006.

[10] M·MMP·4·05·005/02, “Viscosidad rotacional Brookfield de cementos asfálticos”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capítulo 005 Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, 2002.

[11] M·MMP·4·05·007/00, “Punto de inflamación Cleveland en cementos asfálticos”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capítulo 007 Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, 2000.

[12] M·MMP·4·05·006/00, “Penetración en cementos y residuos asfálticos”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capítulo 006 Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, 2000.

[13] M·MMP·4·05·024/02, “Recuperación elástica por torsión en cemento asfáltico modificado”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capítulo 024 Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, 2002.

[14] M·MMP·4·05·009/00, “Punto de reblandecimiento en cementos asfálticos”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capítulo 009 Materiales asfálticos, aditivos y mezclas, 2000.

[15] M·MMP·4·04·002/02, “Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capítulo 002 Materiales pétreos para mezclas asfálticas, 2002.

[16] M·MMP·4·04·005/08, “Partículas alargadas y lajeadas de materiales pétreos para mezclas asfálticas”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capítulo 005 Materiales pétreos para mezclas asfálticas, 2008.

[17] M·MMP·4·04·006/02, “Desgaste mediante la prueba de los ángeles de materiales pétreos para mezclas asfálticas”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capítulo 006 Materiales pétreos para mezclas asfálticas, 2002.

[18] M·MMP·4·04·004/16, “Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capítulo 004 Materiales pétreos para mezclas asfálticas, 2016.

[19] M·MMP·4·04·014/09, “Azul de metileno de materiales pétreos para mezclas asfálticas”, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Capítulo 014 Materiales pétreos para mezclas asfálticas, 2009.

[20] ASTM·D·6928·10, “Método de prueba para determinar la resistencia del agregado pétreo grueso a la degradación mediante el equipo Micro-Deval”, American Society for Testing and Materials, Estados Unidos, Capítulo C136 Método de prueba para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos, 2010.

[21] “Normas para muestreo y pruebas de los materiales equipos y sistemas”, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, Tomo 2 Métodos para diseño y verificación de mezclas asfálticas, 1991.