

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Comparación de las propiedades físico-mecánicas de un
concreto asfáltico convencional y uno modificado con polvo de
llanta triturada y tereftalato de polietileno (PET) por medio
del método *Marshall* y *Superpave***

Trabajo de graduación presentado por Guillermo Daniel Anzueto Pérez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2020

Comparación de las propiedades físico-mecánicas de un concreto asfáltico convencional y uno modificado con polvo de llanta triturada y tereftalato de polietileno (PET) por medio del método *Marshall* y *Superpave*

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




Comparación de las propiedades físico-mecánicas de un concreto asfáltico convencional y uno modificado con polvo de llanta triturada y tereftalato de polietileno (PET) por medio del método *Marshall* y *Superpave*

Trabajo de graduación presentado por Guillermo Daniel Anzueto Pérez
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

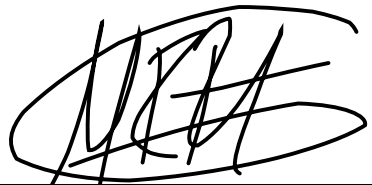
2020

Vo.Bo.:

(f) 

Ing. Rodrigo Rubio

Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Rodrigo Rubio

(f) 

Ing. Otoniel Echeverría

(f) 

Ing. Estuardo Palencia

Fecha de aprobación: Guatemala, 08 de diciembre de 2020.

Las mezclas asfálticas en caliente poseen características que son muy sensibles a las condiciones ambientales, por lo cual, en el presente trabajo de graduación se presentan los resultados de una mezcla convencional y una modificada con caucho proveniente de llantas de automotores y evidencia el comportamiento del Tereftalato de polietileno con el cemento asfáltico (AC-30). Con los diseños de las mezclas asfálticas realizadas por medio de la metodología Marshall y a través del método Superpave se logró evaluar su desempeño. Esta investigación se realizó con la intención de mejorar las características físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas por medio de la incorporación de un polímero reciclado para lograr una mejor durabilidad en el concreto asfáltico y que estas sean más resistentes a las condiciones climáticas junto a los requisitos de carga vehicular; las cuales son sometidas durante su vida útil, así mismo garantizar periodos de mantenimiento en ciclos más prolongados. Al mismo tiempo lograr reducir el impacto ambiental de los desechos sólidos, así como el caucho y el Tereftalato de polietileno, para salvar guardar los ecosistemas y la disponibilidad de recursos naturales que son requeridos para elaborar el concreto asfáltico.

Este trabajo de graduación está dedicado principalmente a Dios mi padre, por brindarme la sabiduría, inteligencia, entendimiento, amor y la fuerza necesaria para alcanzar esta meta; a mis padres, Guillermo Enrique Anzueto Barrios y Silvia Elena Pérez González, por su consejos, tiempo, apoyo y amor incondicional; a mis abuelitas, Elena González Hernández y María Esther Barrios Juárez por su comprensión, sus consejos, y amor incondicional; a mis hermanos Guillermo Enrique, Silvia Esther, Jolie, Bella, Tata y Totoy por siempre apoyarme, alegrarme y motivarme; al ingeniero Roberto Godo, director del departamento de ingeniería civil, por aconsejarme y apoyarme durante toda la carrera; a mis asesores arquitecto Al Moshé Asturias y el Ingeniero Rodrigo Rubio, por apoyarme e instruirme para realizar y finalizar mi trabajo de graduación; a la Universidad del Valle de Guatemala quién me otorgo de las herramientas y el conocimiento de la Ingeniería Civil durante todo el proceso como estudiante.

Lista de siglas y acrónimos

Acrónimo	Español	Inglés
AASHTO	Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales	American Society for Testing and Materials
GCR	Grano de Caucho Reciclado	
INE	Instituto Nacional de Estadística	
MS	Rompimiento medio	Medium Setting
PG	Grado de funcionamiento o grado de desempeño	Performance grade
RS	Rompimiento rápido	Rapid Setting
SBR	butadieno-estireno	SBS
SHRP	Programa Estratégico para Investigación en Carreteras	Strategic Highway Research Program
SS	Rompimiento lento	Slow Setting
Superpave	Pavimentos de asfalto de rendimiento superior	Superior Performing Asphalt Pavements
T.M.A	Tamaño Máximo De Agregado	

Prefacio	V
Lista de siglas y acrónimos	VII
Lista de figuras	XV
Lista de cuadros	XVIII
Resumen	XX
Abstract	XXII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Incorporación de tereftalato de polietileno como agente modificador en el asfalto	3
2.2. Mezclas asfálticas en caliente adicionando tereftalato de polietileno como agregado por el método de Marshall	3
2.3. Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá	4
2.4. Utilización de hule reciclado de neumáticos en pavimentos	5
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Objeto de estudio	11
5.1. Variables independientes	11
5.2. Variable dependiente	11
6. Alcance	13

7. Marco teórico	15
7.1. Estadística aproximada de desechos de polímeros	15
7.2. Situación de las llantas en Guatemala	18
7.2.1. Colocación terminal de las llantas en la ciudad.	19
7.3. Producción de agregados	21
7.3.1. Agregado mineral	21
7.3.2. Agregados naturales	21
7.3.3. Agregados artificiales	21
7.3.4. Otros términos	22
7.3.5. Especificaciones	22
7.3.6. Origen de los agregados	25
7.3.7. Propiedades de los agregados	30
7.4. Caucho reciclado de llantas	33
7.4.1. Grano de caucho reciclado	33
7.4.2. Composición de las llantas	33
7.4.3. Procesos de obtención del grano de caucho reciclado	35
7.4.4. Métodos de adición de GCR en las mezclas asfálticas.	36
7.4.5. Ventajas y desventajas del GCR	38
7.5. Tereftalato de polietileno	39
7.5.1. Definición	39
7.5.2. Degradación y reciclaje del PET	39
7.5.3. Propiedades del PET	40
7.5.4. Preparación del PET para mezclas asfálticas	40
7.6. Tipos y usos de los asfaltos	41
7.6.1. Asfaltos	41
7.6.2. Clasificación y especificaciones	41
7.6.3. Usos y funciones del asfalto	43
7.6.4. Composición química del asfalto	43
7.6.5. Características reológicas del asfalto	43
7.6.6. Asfaltos modificados	44
7.6.7. Durabilidad de los asfaltos	50
7.6.8. Propiedades reológicas y comportamiento en servicio	51
7.6.9. Emulsión de asfalto modificado con polímero	55
7.6.10. Especificaciones de utilización	56
7.7. Mezclas asfálticas	57
7.7.1. Generalidades	57
7.7.2. Agregados pétreos	58
7.7.3. Concreto asfáltico	61
7.7.4. Mezclas asfálticas modificadas	62
7.8. Fallas en pavimentos flexibles	63
7.8.1. Tipo de fallas y su clasificación	63
7.8.2. Fallas típicas por deformaciones	65
7.8.3. Causas posibles del origen de las fallas según su tipo	68
7.9. Deterioro en pavimentos asfálticos	70
7.9.1. Fisuras y grietas	70

8. Metodología	75
8.1. Obtención del polvo de llanta triturada	75
8.2. Obtención del polvo del tereftalato de polietileno	75
8.3. Obtención de asfalto y agregados	76
8.4. Desarrollo experimental	77
8.4.1. Normas	77
8.4.2. Agregados minerales	78
8.4.3. Cemento asfáltico	92
8.4.4. Colocación de polímeros	98
8.4.5. Método Marshall	100
8.4.6. Superpave	108
9. Diseño de mezclas asfálticas	111
9.1. Granulometría	111
9.2. Mezcla convencional	113
9.2.1. Gravedad específica Bulk	113
9.2.2. Gravedad específica teórica máxima	114
9.2.3. Porcentaje de vacíos	114
9.2.4. Prueba de estabilidad y flujo Marshall	115
9.2.5. Ensayo de Rueda de Hamburgo	115
9.3. Mezcla modificada con caucho	117
9.3.1. Gravedad específica Bulk	117
9.3.2. Gravedad específica teórica máxima	118
9.3.3. Porcentaje de vacíos	118
9.3.4. Prueba de estabilidad y flujo Marshall	119
9.3.5. Ensayo de Rueda de Hamburgo	119
10. Análisis y comparación de resultados	121
10.1. Cemento asfáltico	121
10.1.1. Modificado con PET	121
10.1.2. Comparación	123
10.2. Concreto asfáltico	123
10.2.1. Gravedad específica bruta Bulk	124
10.2.2. Gravedad específica teórica máxima	124
10.2.3. Vacíos de aire o porcentaje de vacíos	125
10.2.4. Estabilidad Marshall	126
10.2.5. Flujo Marshall	128
10.3. Discusión general	130
11. Conclusiones	137
12. Recomendaciones	139
13. Bibliografía	141
14. Anexos	143
15. Glosario	153

Figura	Página
1. Eliminación de residuos sólidos en el 2015	16
2. Desechos plásticos en los departamentos con valores significativos en el 2015 .	17
3. Desechos importantes en Guatemala para departamentos con valores signifi- cativos en el 2015	18
4. 10 años de neumáticos acumulados por importación de los años 2006 al 2015	20
5. Granito tipo de roca ígnea	26
6. Conglomerado tipo de roca sedimentaria	27
7. Cuarzita tipo de roca metamórfica	27
8. Ciclo de las rocas	28
9. Proceso de molienda a temperatura ambiente	35
10. Proceso de molienda a temperatura ambiente	36
11. Proceso de adición de caucho vía húmeda	37
12. Proceso de adición de caucho vía seca	38
13. Características deseadas de una mezcla asfáltica	45
14. Ligante modificado con matriz de bitumen - microestructura - contenido de polímero inferior al 4%	48
15. Ligante modificado con dos fases - microestructura - contenido de polímero del 5%	48
16. Ligante modificado con matriz de polímero - microestructura - contenido de polímero superior al 7%	49
17. Cemento asfáltico - curva de flujo	52
18. Cambio de velocidad en la deformación para distintos tipos de cemento asfál- tico	52
19. Relación viscosidad-temperatura de un cemento asfáltico	53
20. Cementos asfálticos - Curva de susceptibilidad térmica	54
21. Agregados pétreos provenientes de una planta de trituración	59
22. Máquina de los ángeles	60
23. Calibrador proporcional para el índice de aplanamiento y alargamiento	61
24. Equivalente de arena	61
25. Proceso de producción de asfalto modificado con caucho	63

26.	Corrugación causada por la acción de tránsito combinada con una carpeta o base inestable	64
27.	Depresión o asentamiento causado por una construcción incorrecta en las capas superiores del pavimento	64
28.	Piel de cocodrilo causada por las cargas repetidas de tránsito	65
29.	Huella de rodadura	65
30.	Canalizaciones	66
31.	Asentamientos transversales	66
32.	Baches	67
33.	Corrugaciones	67
34.	Desplazamiento de borde	68
35.	Fisura piel de cocodrilo	71
36.	Fisura en bloque	73
37.	INREGUA	75
38.	PET recortado	76
39.	Empresa proveedora de asfalto	76
40.	Planta proveedora de agregado	77
41.	Equipo utilizado para el ensayo de equivalente de arena	79
42.	Máquina de los ángeles con vista en su interior	81
43.	Graduaciones de las muestras de ensayo	82
44.	Cantidad de esferas en máquina de los ángeles	82
45.	Ensayo de gravedad específica para agregados	83
46.	Recipiente y agregados utilizados para medir el peso unitario	85
47.	Dispositivo de calibración proporcional	87
48.	Determinación de relación para partícula plana o alargada	88
49.	Caras fracturas en 2 caras o más	89
50.	Caras fracturadas en 1 cara	89
51.	Cantidad mínima de muestra para el ensayo de partículas con caras fracturadas	90
52.	Ejemplo de curva granulométrica para un diseño de concreto asfáltico	92
53.	Equipo utilizado para el ensayo de penetración	93
54.	Equipo utilizado para el ensayo de recuperación elástica por torsión	95
55.	Equipo utilizado para el punto de ablandamiento	97
56.	Equipo utilizado para el proceso de mezclado del aditivo con el asfalto	99
57.	Mezclado del aditivo con el asfalto	99
58.	Probeta de concreto asfáltico convencional y modificado I	101
59.	Peso de probeta suspendida en agua	103
60.	Equipo utilizado para la gravedad específica teórica máxima	105
61.	Anillo dinamométrico,	107
62.	Máquina de rueda cargada de Hamburgo o Rueda de Hamburgo	109
63.	Curva granulométrica utilizada para ambos tipos de diseño de mezcla asfáltica	112
64.	Resultados de la mezcla convencional para el ensayo de la Rueda de Hamburgo	116
65.	Resultados de la mezcla modificado para el ensayo de la Rueda de Hamburgo	120
66.	Resultado de la modificación del cemento asfáltico con tereftalato de polietileno	122
67.	Sedimentación del PET en el cemento asfáltico	122

68.	Gráfico % vacíos en la mezcla compactada (VMC) - % bitumen (mezcla convencional)	125
69.	Gráfico % vacíos en la mezcla compactada (VMC) - % bitumen (mezcla modificada con caucho)	126
70.	Gráfico de estabilidad Marshall (Diseño convencional)	127
71.	Gráfico de estabilidad Marshall (Mezcla modificada)	127
72.	Gráfico de flujo Marshall (Diseño convencional)	128
73.	Gráfico de flujo Marshall (Mezcla modificada con caucho)	129
74.	Ensayo de equivalente de arena después de la sedimentación	143
75.	Esferas de acero que se utilizan en la máquina de los ángeles	143
76.	Lavado de agregado para determinación de la gravedad específica del agregado	144
77.	Realización del ensayo de penetración para el cemento asfáltico modificado . .	144
78.	Resultado del ensayo de recuperación elástica por torsión para el cemento asfáltico convencional	145
79.	Colocación del cemento asfáltico convencional en anillos de soporte y de bolas de aceros	145
80.	Resultado de punto de ablandamiento para el cemento asfáltico modificado . .	146
81.	Quintal de caucho	146
82.	PET recolectado	147
83.	Martillo de compactación de operación manual	147
84.	Mezclado de agregados pétreos y cemento asfáltico	148
85.	Extracción de la probeta del molde cilíndrico	148
86.	Probeta de concreto asfáltico modificado luego de su extracción del molde . .	149
87.	Vista en planta de probeta de concreto asfáltico convencional y modificado .	149
88.	Ejemplo de operación de la rueda de Hamburgo	150
89.	Ejemplo de falla de la rueda de Hamburgo	150
90.	Página número 2 del informe del ensayo de la Rueda de Hamburgo realizada en El Salvador para la mezcla convencional	151
91.	Página número 2 del informe del ensayo de la Rueda de Hamburgo realizada en El Salvador para la mezcla modificada	152

Cuadro	Página
1. Porcentaje de distintos desechos sólidos domiciliarios para cada departamento en el 2015	15
2. Métodos para descartar la basura en el 2015	16
3. Desechos domiciliarios de sólidos y plásticos, generados en el 2015	17
4. Desechos domiciliarios de sólidos y plásticos, generados en el 2015	19
5. Características y composición de las llantas, estos valores pueden cambiar dependiendo del tipo de llanta, el fabricante o país	34
6. Emulsiones asfálticas modificadas con polímeros y sus aplicaciones	55
7. Material de mezcla según clase de asfalto	56
8. Tratamientos superficiales dependiendo de la categorías y tipos de ligantes	56
9. Ensayos que se deben de realizar a los ligantes asfálticos	57
10. Niveles de severidad fisura piel de cocodrilo	71
11. Niveles de severidad de fisura en bloque	72
12. Normas utilizadas para los ensayos de los agregados pétreos	77
13. Normas utilizadas para los ensayos del cemento asfáltico	77
14. Normas utilizadas para los ensayos del concreto asfáltico	78
15. Normas utilizadas para los ensayos del desempeño del concreto asfáltico	78
16. Tipos de granulometría para concretos asfálticos	91
17. Requisitos para un concreto asfáltico	100
18. Porcentaje de vacíos del agregado mineral	100
19. Porcentaje de participación para cada tipo de agregado pétreo	111
20. Porcentaje utilizado para cada tamiz y valores establecidos en las especificaciones	112
21. Datos y resultados de la gravedad específica Bulk, mezcla convencional	113
22. Datos y resultados de la gravedad específica teórica máxima, mezcla convencional	114
23. Tabla VI. Datos y resultados del porcentaje de vacíos, mezcla convencional	114
24. Resultados de la prueba de estabilidad y flujo Marshall, mezcla convencional	115

25.	Resultados de la mezcla convencional para el ensayo de la Rueda de Hamburgo	115
26.	Datos y resultados de la gravedad específica Bulk, mezcla modificada	117
27.	Datos y resultados de la gravedad específica teórica máxima, mezcla modificada	118
28.	Tabla VII. Datos y resultados del porcentaje de vacíos, mezcla modificada . .	118
29.	Resultados de la prueba de estabilidad y flujo Marshall, mezcla modificada . .	119
30.	Resultados de la mezcla modificado para el ensayo de la Rueda de Hamburgo	119
31.	Cuadro comparativo de las características generales del asfalto AC-30 estándar y modificado	123
32.	Cuadro comparativo de gravedad específica Bulk	124
33.	Cuadro comparativo de gravedad específica teórica máxima	124
34.	Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos	125
35.	Cuadro comparativo de estabilidad Marshall	126
36.	Cuadro comparativo de flujo Marshall	128
37.	Resultados del ensayo de dformación permanente en la Rueda de Hamburgo mezcla conveccional	129
38.	Resultados del ensayo de dformación permanente en la Rueda de Hamburgo mezcla modificada	130
39.	Resultados por cada tipo de concreto asfáltico.	130
40.	Resumen de resultados para el ensayo de la Rueda de Hamburgo	134
41.	Pagina número 1 del informe del ensayo de la Rueda de Hamburgo realizada en El Salvador para la mezcla convencional	151
42.	Pagina número 1 del informe del ensayo de la Rueda de Hamburgo realizada en El Salvador para la mezcla modificada	152

El crecimiento poblacional en Guatemala, es decir, el incremento de la población, es un factor influyente y se encuentra en estrecha relación con la generación de desechos que son producidos en el mismo país, puesto que, año tras año, tiende a aumentar notoriamente. Entre tanto, otro factor que interviene es el aumento de la demanda comercial, principalmente, la demanda polimérica, es decir, de plásticos. La mayoría de los productos que se emplean en el mundo se derivan de dicho material como por ejemplo, los recipientes, los embaces, las bolsas, los utensilios, etc.; lo que hace que el país cuente con gran abundancia de plástico.

Es por ello por lo que se han ideado diversas alternativas para reducir la cantidad de polímeros (plásticos) que se encuentran en la región. Uno de estos métodos de reducción de desechos poliméricos, consiste en la construcción de pavimentos asfálticos, dado que estos poseen la capacidad de poder mezclar o incorporar polímeros en sus asfaltos en aras de mejorar las propiedades mecánicas de los mismos. De esa manera, se logra reducir la contaminación en el país causada por los desechos plásticos. En ese sentido, cabe preguntarse: ¿Cómo reducir el uso del material plástico? Para ello, resulta sumamente conveniente la reutilización de materiales que son difíciles de reciclar, como lo son las llantas de caucho de los automóviles (SBS) y el tereftalato de polietileno (PET).

Al mismo tiempo, teniendo en cuenta el factor ecológico y económico, es posible mejorar las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica, pues normalmente se utilizan materiales que se consideran contaminantes para el medio ambiente. No obstante, a pesar de la cantidad de materiales que ayudan a mejorar y recuperar los asfaltos, cabe mencionar que no se ha logrado determinar cuál de estos obtiene mejores propiedades mecánicas en los mismos. Así pues, para dar desarrollo a la presente investigación, se ha trazado el siguiente objetivo: determinar el polímero que brinda mejores propiedades tanto físicas como mecánicas en los asfaltos modificados con polvo de llanta triturada y tereftalato de polietileno (PET); para así comparar los resultados con una muestra base, es decir, el diseño convencional de una mezcla asfáltica.

En tal sentido, es de señalar que todas las pruebas de laboratorio se realizaron con los procedimientos y especificaciones establecidas en la ASSHTO, ASTM, INV y NTG. Teniendo en cuenta que los métodos empleados en las pruebas de laboratorio están normados, esta investigación se puede replicar en estudios y diseños de mezclas asfálticas. Por ello,

los resultados obtenidos pueden generar un gran aporte para mejorar la relación costo-propiedad, pues los polímeros reciclados cuentan con un precio accesible y, al momento de emplearlo en la mezcla asfáltica, estos pueden llegar a alcanzar excelentes propiedades. Asimismo, esto ayudaría a que las constructoras puedan conocer las ventajas y beneficios que los polímeros reciclados pueden proporcionar. En consecuencia, la interiorización de esos métodos de diseño/reciclaje, contribuiría a la reducción de la contaminación en los ecosistemas, brindando así un ambiente más saludable para los guatemaltecos.

Population growth in Guatemala, that is, the increase in population, is an influential factor and is closely related to the generation of waste that is produced in the same country, since, year after year, it tends to increase significantly. Meanwhile, another factor that intervenes is the increase in commercial demand; mainly polymeric demand, that is, plastics. Most of the products used in the world are derived from this material, such as containers, packages, bags, utensils, etc., which make the country have a great abundance of plastic.

That is why several alternatives have been devised to reduce the amount of polymer (plastics) found in the region. One of the methods to reduce polymeric waste consists of constructing asphalt pavements since these have the ability to mix or incorporate polymers in their asphalts in order to improve their mechanical properties. This way, it is possible to reduce pollution in the country caused by plastic waste. In this sense, it is worth asking: How to reduce the use of plastic material? For this, it is extremely convenient to reuse materials that are difficult to recycle, such as rubber car tires (SBS) and polyethylene terephthalate (PET).

At the same time, taking into account the ecological and economic factors, it is possible to improve the mechanical properties of an asphalt mix, since normally materials that are considered polluting for the environment are used. However, despite the number of materials that help improve and recover asphalt, it should be mentioned that it has not been possible to determine which of these obtains better mechanical properties in them. Thus, to develop this research, the following objective has been set: to determine the polymer that provides the best physical and mechanical properties in asphalt modified with crushed tire powder and polyethylene terephthalate (PET), in order to compare the results with a base sample, that is, the conventional design of an asphalt mix.

In this sense, it should be noted that all laboratory tests were carried out with the procedures and specifications established in ASSHTO, ASTM, INV y NTG. Bearing in mind that the methods used in laboratory tests are standardized, this research can be replicated in studies and designs of asphalt mixtures. Therefore, the results obtained can generate a great contribution to improving the cost-property relationship, since recycled polymers have an accessible price and, when used in the asphalt mix, they can achieve excellent properties. Likewise, this would help construction companies to know the advantages and benefits that

recycled polymers can provide. Consequently, the internalization of these design/recycling methods would contribute to the reduction of pollution in ecosystems, thus providing a healthier environment for Guatemalans.

Las mezclas asfálticas en caliente cada vez poseen una menor capacidad de soportar los requerimientos para carga, degradación y envejecimiento por la acción del clima sobre el concreto asfáltico, además las solicitaciones de carga para las mezclas asfálticas son mayores debido a que la capacidad de carga de los automóviles conforme pasa el tiempo es mayor, principalmente en países como Guatemala en el cual no hay un constante control sobre las capacidades de carga de los vehículos. A causa de la constante degradación de los pavimentos en un corto plazo de tiempo, ha surgido la necesidad de modificar las mezclas asfálticas con polímero para poder brindar un aumento en sus características físicas y mecánicas para poder soportar de una manera óptima los requerimientos a los cuales están sometidos los concretos asfálticos durante su vida útil y así garantizar una mayor durabilidad.

Actualmente, Guatemala todavía posee una amplia disponibilidad de recursos naturales que son utilizados para la elaboración de las mezclas asfálticas; sin embargo es necesario cuidar estos recursos ya que conforme pasa el tiempo la necesidad de utilizar materiales de mejor calidad es mayor, por lo cual la modificación de las mezclas asfálticas con materiales reciclados, así como el caucho y el tereftalato de polietileno, son una opción para empezar a cuidar los recursos naturales que se tienen. Al ser modificados las mezclas asfálticas llegan a tener cambios significativos que son beneficios para el desempeño de las mezclas asfálticas, por lo tanto, su tiempo de vida se ve prolongando al igual que el tiempo que hay entre los periodos de mantenimiento; dando como resultado la reducción de la necesidad de utilizar materia prima natural.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo aplicar el método Marshall y Superpave para evaluar las propiedades físico-mecánicas de un concreto asfáltico convencional y un modificado con polvo de llanta triturada y tereftalato de polietileno (PET), aplicados como aditivos en la mezcla. Este documento muestra los procedimientos para determinar las propiedades de los agregados pétreos, los ensayos para la caracterización del cemento asfáltico; tanto el convencional como el modificado, los ensayos para la metodología Marshall y el procedimiento para determinar el desempeño de la mezcla asfáltica modificada y convencional por medio de la rueda de Hamburgo.

Esta investigación también muestra los resultados del diseño de las mezclas asfálticas por medio del método Marshall y de la evaluación de desempeño de la mezcla asfáltica convencional y modificada por medio del método de Superpave. Asimismo, se expone cuál de los polímeros estudiados brinda mejores propiedades físicas y mecánicas; por último, se realiza el estudio de comparación en los resultados obtenidos para una mezcla convencional y una modificada con 3% de caucho.

2.1. Incorporación de tereftalato de polietileno como agente modificador en el asfalto

Vidal, Ramirez y Grajales en el año 2014 en la Universidad Javeriana Cali, Colombia presentaron su trabajo de investigación con el objetivo de encontrar un porcentaje óptimo de uso del PET, incorporándolo como un agente modificador de las mezclas asfálticas. El primer paso que realizaron fue hacer los ensayos de comportamiento mecánico a los agregados. Posteriormente se procedieron a analizar la penetración, el punto de ablandamiento, la viscosidad y la durabilidad del asfalto. Luego, se realizó un diseño mediante el método Marshall, suponiendo un nivel de tránsito NT2, concluyendo que el porcentaje de asfalto a utilizar en la mezcla era 5 %. Después plantearon tres porcentajes de PET, 3 %, 5 % y 7 % de la masa total del asfalto, con los cuales modificaron el bitumen, pero el protocolo de mezcla que utilizaron provocó que el material se aglutinara en el fondo del recipiente, lo cual no fue adecuado para lograr una mezcla homogénea. Por lo mencionado anteriormente, optaron por utilizar el PET como parcial de arena. Basándose en estudios anteriores se plantearon tres porcentajes de PET a utilizar; 5 %, 8 % y 11 %, analizaron la estabilidad y el flujo de la mezcla modificada. Finalmente, los resultados que obtuvieron les permitió concluir que el PET como parcial de arena, altera el comportamiento de la mezcla modificada de una manera considerable, mejorando la estabilidad en un 79 % con 5 % de PET. Sin embargo, obtuvieron un aumento en la deformación de la mezcla, con 8 % de PET, de 140 % respecto a la mezcla sin modificar.

2.2. Mezclas asfálticas en caliente adicionando tereftalato de polietileno como agregado por el método de Marshall

Ortiz, Brayan en el año 2017 en la Universidad de San Carlos de Guatemala presento un trabajo de investigación en el cual evalúa las características físicas y las propiedades

mecánicas de un diseño de mezcla asfáltica con el método de Marshall, con granulometría tipo E de la sección 400 del “Libro Azul”, adicionando un porcentaje de agregado de tereftalato de polietileno (PET), estimado como referencia a la cantidad de agregado pétreo.

En la investigación se evaluó la proporción que se utilizó y la representación que este ocupó en el diseño de mezcla asfáltica. Además, se llevó a cabo un diseño de mezcla asfáltica convencional y se comparó con el diseño de mezcla asfáltica, adicionando tereftalato de polietileno (PET) con 4 %, 4.5 %, 5 %, 5.5 % y 6 %, como agregado.

Se evaluaron las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional y de la mezcla asfáltica adicionando tereftalato de polietileno (PET) como agregado, además se verificó que los agregados utilizados para los diseños de mezcla asfáltica estuvieran en condiciones óptimas, de acuerdo a los procedimientos y especificaciones aplicables indicados por ASSHTO y ASTM.

Al finalizar la investigación Ortiz Concluyo que la resistencia de la mezcla asfáltica con tereftalato de polietileno (PET) y la mezcla asfáltica propuesta normal, cumple superando el rango de estabilidad que tiene un valor mínimo de 1 200 lbf. En la mezcla asfáltica donde se utilizó tereftalato de polietileno (PET) se obtuvieron valores a bajo de este límite, siendo no es estable. Asimismo, menciona que las características físicas y propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas evaluadas son muy distintas, debido a que la mezcla asfáltica con tereftalato de polietileno (PET) tiene deficiencias notables, comparándolos con un diseño de mezcla propuesto normal.

2.3. Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá

Díaz y Castro en el año 2017 presentaron una monografía en la cual sintetizan diferentes investigaciones a nivel internacional donde se demuestra que la implementación del GCR en los pavimentos es una alternativa para solucionar problemas de tipo mecánico en los pavimentos y mitigar impactos ambientales que genera el mal manejo de las llantas deshechas.

La adición de GCR para la modificación de las mezclas asfálticas, se traduce en una gran cantidad de beneficios, debido a las investigaciones que se han avanzado en los últimos años, han demostrado que este tipo de modificaciones son más durables con respecto a las convencionales, económicas a largo plazo pues se disminuyen los mantenimientos y aumenta su durabilidad, además contribuyen a la reducción de impactos negativos para el medio ambiente como lo son, la quema indiscriminada de las llantas desechadas dando paso a las emisiones de CO₂, uno de los gases tóxicos más contaminantes del mundo causantes del calentamiento global, entre otros.

Según una revisión bibliográfica que realizaron, logran resumir las ventajas y desventajas técnicas, económicas y ambientales que se obtienen al hacer uso del grano de caucho reciclado para mejorar las mezclas asfálticas. Entre las ventajas se puede mencionar que las mezclas son más resistentes a los fenómenos de fatiga, ahuellamiento, aumenta la resistencia al envejecimiento y oxidación del ligante asfáltico.

2.4. Utilización de hule reciclado de neumáticos en pavimentos

Bernhard, Andrés en el año 2009 realizó una investigación sobre hule reciclado proveniente de neumáticos usados para agregarle a las mezclas de pavimentos asfálticos. Menciona que esta adición de hule a los pavimentos ha sido utilizada en otros países y ha demostrado mejoras en sus propiedades físicas y mecánicas (mejor adherencia de los neumáticos, mayor resistencia al agrietamiento por fatiga y contracción, mayor resistencia a la edad, menores deformaciones permanentes, etc.). Además, alude a que esta adición reduce el exceso de llantas desechadas y proporciona una solución para el manejo de desechos sólidos conformados por neumáticos.

El documento muestra de forma general los procesos constructivos y las propiedades que se obtienen en las mezclas de pavimentos con la adición de hule, con el fin de mostrar un segmento del mercado al que se pueden orientar los productos derivados del reciclaje de llantas usadas para mejorar las mezclas, reducir materiales y utilizar de forma sostenible el exceso de neumáticos desechados.

Bernhard al realizar la investigación concluye que el reciclaje de neumáticos contribuye a la disminución de desechos sólidos y previene la propagación de enfermedades como la malaria y el dengue; las propiedades obtenidas con la adición de hule asfáltico a mezclas de pavimentos son la resistencia al ahuellamiento, la resistencia al agrietamiento por fatiga y contracción, y mejoras en la interacción vehículo-pavimento; las mezclas con hule asfáltico son reciclables y los materiales pueden ser reutilizados para rehabilitaciones de pavimentos dañados.

La presente investigación se enfocará en determinar/comparar las propiedades tanto mecánicas como físicas de los asfaltos modificados con polvo de llanta triturada y tereftalato de polietileno (PET), debido a que, actualmente en Guatemala, el número de constructoras que utilizan estos materiales reciclados son muy escasas. En la sección 401 del “Libro Azul” titulada “Pavimento de Concreto Asfáltico en Caliente” de la Dirección General de Caminos (2001) se hace énfasis en los polímeros que son elaborados especialmente para asfaltos o que se obtienen directamente de una fábrica especializada en la elaboración de polímeros especiales para mezclas asfálticas; sin especificar ningún tipo de material reciclable que sea aplicable a los asfaltos.

Sin embargo, resulta evidente que las constructoras no toman en cuenta el polímero reciclado a pesar de las diversas de investigaciones teóricas que se han realizado al respecto en el país; como tampoco son tenidos en cuenta los beneficios que generan dentro de los ecosistemas y en las propiedades mecánicas de los asfaltos. Sumado a ello, como se mencionó, la cantidad de desechos poliméricos en Guatemala es muy elevada, pues así se expone en el documento llamado “Sistema de Contabilidad Ambiental y Económico de Guatemala 2001 – 2010: Compendio estadístico” (SCAE 2001-2010) realizada por Instituto Nacional de estadística (INE) y el Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad (IARNA). En dicho documento, se estableció que solo en el año 2010 se generaron 149 507 2 toneladas de desechos plásticos, siendo este equivale a 0.132 % de todos los desechos generados en Guatemala. A pesar de que el valor es bajo, el problema no está en la cantidad, sino que radica en que este es un material muy difícil de reciclar y genera grandes impactos en los ecosistemas, reduciendo la calidad de vida de los seres humanos y demás animales (INE & IARNA, 2013).

La pertinencia de esta investigación estriba en que la mayor parte de las investigaciones en Guatemala, solo han brindado descripciones generales de las propiedades que se pueden obtener; sin embargo, son pocos los análisis o estudios que comprenden pruebas de laboratorio que garanticen que estos materiales verdaderamente mejoran las propiedades mecánicas y físicas de los asfaltos. Además, los documentos que rigen el diseño de las mezclas asfálti-

cas en Guatemala, como el “Libro Azul” de Caminos (2001), no especifican ningún tipo de polímero reciclado provocando la disminución residual de esos materiales.

Otro motivo por el cual se busca realizar estos ensayos con diferentes materiales es debido a que existen pocos estudios de laboratorio que han trabajado con el caucho triturado y el PET al mismo tiempo, debido a que solo analizan un tipo de polímero; no se puede realizar una comparación con otro estudio que haya utilizado otro tipo de polímero, ya que, el contenido y el tipo de agregados que hayan utilizado para realizar la mezcla asfáltica son distintos entre mezclas, por lo cual esto pueden afectar el comportamiento de diferentes maneras. Por esto, se busca establecer un mismo diseño, teniendo como un único factor de diferencia entre agregados, el aditivo (polímero) a utilizar para la elaboración de la mezcla

Así pues, en la medida en que se lleven a cabo ensayos de laboratorio, en los que se evidencie qué los asfaltos modificados con materiales reciclados brindan mejores propiedades y se logre determinar que uno de los dos materiales tiene mejores capacidades, se podrá contar con una base investigativa para persuadir a constructoras y entidades sobre el uso adecuado de la aplicación de asfaltos modificados. En últimas, se podrá reducir el impacto ambiental y la huella ecológica que causa la elaboración y construcción de carreteras en la actualidad.

4.1. Objetivo general

Aplicar el método Marshall y Superpave para evaluar las propiedades físico-mecánicas de un concreto asfáltico convencional y un modificado con polvo de llanta tritura y tereftalato de polietileno (PET), aplicados como aditivos en la mezcla.

4.2. Objetivos específicos

- Diseño de la mezcla patrón y el modificado.
- Determinar cuál de los dos polímeros estudiados brinda mejores propiedades físicas y mecánicas en el concreto asfáltico.
- Comparar los resultados de las mezclas modificadas con la mezcla patrón.

5.1. Variables independientes

- Agregados
- Cemento asfáltico
- Polvo de llanta triturada
- Tereftalato de polietileno

5.2. Variable dependiente

El objeto de estudio identificado es el concreto asfáltico ya que este está integrado por todas las variables de estudio. Además, a este es el que se le colocará los dos tipos de aditivos (polvo de llanta triturada y tereftalato de polietileno) para cambiar sus propiedades físicas y mecánicas. Asimismo, los resultados de los concretos asfálticos son los cuales se compararán para determinar cuál de estos tiene mejores propiedades y para poder llegar a una conclusión en el trabajo de investigación.

Este trabajo de investigación tendrá un alcance, principalmente, en el sector de la construcción de carreteras en Guatemala, dado que estas pruebas de laboratorio darán a conocer las mejoras que se pueden generar en las mezclas asfálticas utilizando polímeros que se pueden encontrar en el ambiente como desecho. En ese sentido, al obtener estas mejoras con materiales reciclados, se puede obtener una mejor relación entre costo-propiedad, pues los materiales tienen un precio muy bajo y se pueden llegar a alcanzar grandes propiedades. Por lo tanto, estos resultados pueden ser de interés a las constructoras guatemaltecas, debido a que estos materiales pueden mejorar la vida útil de las carreteras que diseñan y construyen a un menor costo de producción.

Por otra parte, esta investigación también será de utilidad para el sector educativo puesto que ellos podrán conocer y emplear el estudio y en esa medida, enseñar cómo es posible que un material considerado como basura pueda contribuir a la mejora de las propiedades de una carretera. Como resultado, puede abrir el panorama a muchos estudiantes para considerar e incluir materiales que se consideran insignificantes, en procesos de elaboración de materiales de construcción, permitiendo así reducir el impacto que pueden llegar a tener estos materiales.

7.1. Estadística aproximada de desechos de polímeros

El Instituto Nacional de Estadística en el año 2015 menciona que en Guatemala se generó aproximadamente de 12 000 a 14 000 toneladas métricas de desechos sólidos por día. Según el folleto Caracterización Departamental, realizado por el Instituto Nacional de Estadística, un porcentaje de desperdicios sólidos fue de un 2,4 % en el año 2012 en relación a lo producido en el año 2011 el cual fue de 2 017 481 toneladas métricas, asimismo en el año 2013 con la implementación de programas ambientales disminuyó a un 1,8 % de residuos sólidos tomando como referencia a lo generado en el año 2012 el cual fue de 516 212 toneladas métricas (Ortíz, 2017).

A continuación se muestran cuadros y graficas de las forma de eliminación de la basura en Guatemala, los porcentajes de diversos residuos sólidos domiciliarios por departamento y de desechos sólidos y plásticos domiciliarios (Ortíz, 2017).

Cuadro 1: Porcentaje de distintos desechos sólidos domiciliarios para cada departamento en el 2015

Departamento	Alimento	Papel y cartón	Madera	Plástico	Cuero	Vidrio	Textiles	Ripio
Guatemala	34,2	18,6	2,9	17	2	2,8	9,3	13,2
El Progreso	47,1	16,4	6,4	16,4	0,3	2,8	4,2	6,4
Sacatepéquez	51	12,5	6,3	11	3,9	3,6	5,5	6,3
Escuintla	26,3	13,8	22,3	15,3	1,8	7,5	7,3	6
Santa Rosa	48,3	12	4,3	18,3	2	4,3	5,7	5
Sololá	41,3	13,3	6,3	23,3	2,3	4,7	3,9	4,8
Retalhuleu	36,8	20,3	9,4	11,7	2,9	5	7,6	6,3
San Marcos	40,2	14,3	8,4	18,4	4,2	4,5	4	5,9
Huehuetenango	38,6	17	4,9	26,4	2,3	4	4,6	2,3
Quiché	49,2	10,4	5,3	15,9	3,2	4,2	5,8	6,1
Baja Verapaz	32,5	17,5	2,5	20	1	12,5	4	10
Alta Verapaz	41,9	17,1	8,2	17	4,2	4,8	4,7	9
Petén	23,3	22	15,5	18,5	2,5	5,5	5,3	7,5
Zacapa	49,7	14,3	6,7	18,3	0,7	2	1,7	6,7
Jalapa	31,5	18,5	5	12,5	6	11	9	6,5
Jutiapa	42,9	12,5	4,2	11,8	3,4	3,4	6,2	15,5

(Ortíz, 2017)

Cuadro 2: Métodos para descartar la basura en el 2015

Departamento	Formas de eliminar desechos sólidos		
	Servicio municipal en porcentaje	La queman en porcentaje	La tiran en la calle en porcentaje
Guatemala	29,5	13,4	57,2
El Progreso	31,9	48,2	19,9
Sacatepéquez	41,3	12,1	46,6
Chimaltenango	17,0	33,2	49,8
Escuintla	17,0	45,5	37,5
Santa Rosa	20,6	56,6	22,8
Sololá	33,9	48,1	18,0
Totonicapán	14,4	52,2	33,3
Quetzaltenango	33,3	41,4	25,2
Suchitepéquez	10,1	53,3	36,7
Retalhuleu	7,0	70,9	22,1
San Marcos	11,8	61,1	27,1
Huehuetenango	14,5	53,9	31,6
Quiché	18,6	52,0	29,4
Baja Verapaz	7,1	70,3	22,6
Alta Verapaz	7,3	66,2	26,5
Petén	1,9	85,8	12,4
Izabal	15,3	67,2	17,6
Zacapa	40,8	43,3	15,9
Chiquimula	16,0	41,6	42,4
Jalapa	9,3	41,2	49,5
Jutiapa	19,5	58,6	21,9

(Ortíz, 2017)

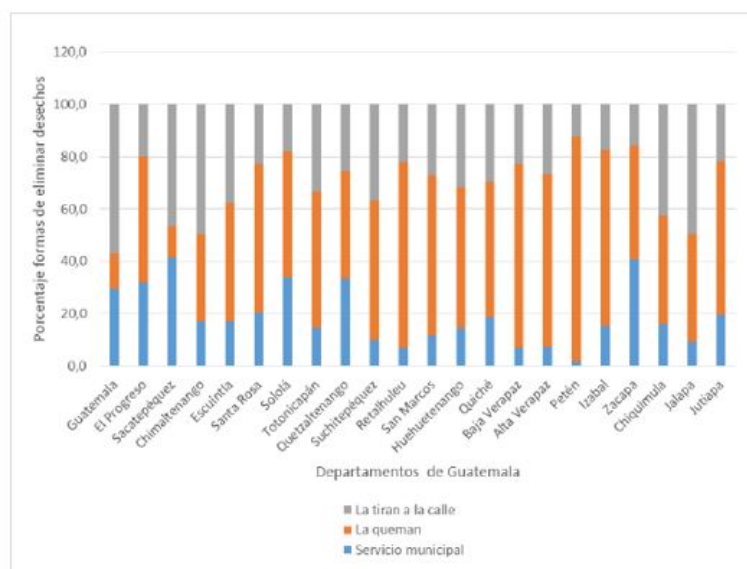


Figura 1: Eliminación de residuos sólidos en el 2015
(Ortíz, 2017)

Cuadro 3: Desechos domiciliarios de sólidos y plásticos, generados en el 2015

Departamento	Miles de ton. de sólidos generados	Miles de ton. de plástico generados
Guatemala	482,7	82,059
El Progreso	20,6	3,378
Sacatepéquez	20,9	2,299
Escuintla	103,5	15,836
Santa Rosa	45,6	8,345
Sololá	54,1	12,605
Retalhuleu	45,2	5,288
San Marcos	152	27,968
Huehuetenango	108,2	28,565
Quiché	134,6	21,401
Baja Verapaz	33	6,60
Alta Verapaz	138	23,460
Petén	39	7,215
Zacapa	20,7	3,788
Jalapa	44,2	5,525
Jutiapa	59,1	6,974
TOTAL	1501,4	261,307

(Ortíz, 2017)

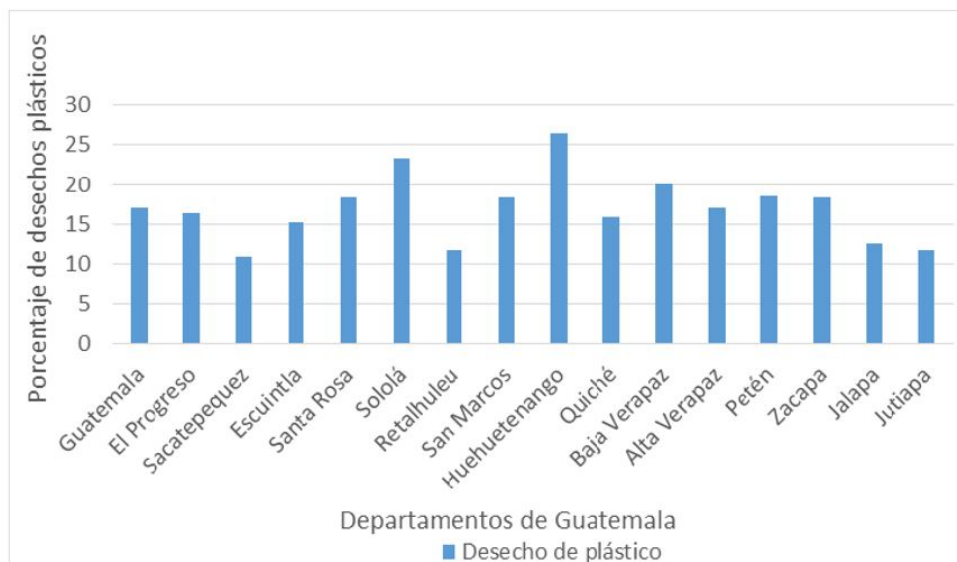


Figura 2: Desechos plásticos en los departamentos con valores significativos en el 2015 (Ortíz, 2017)

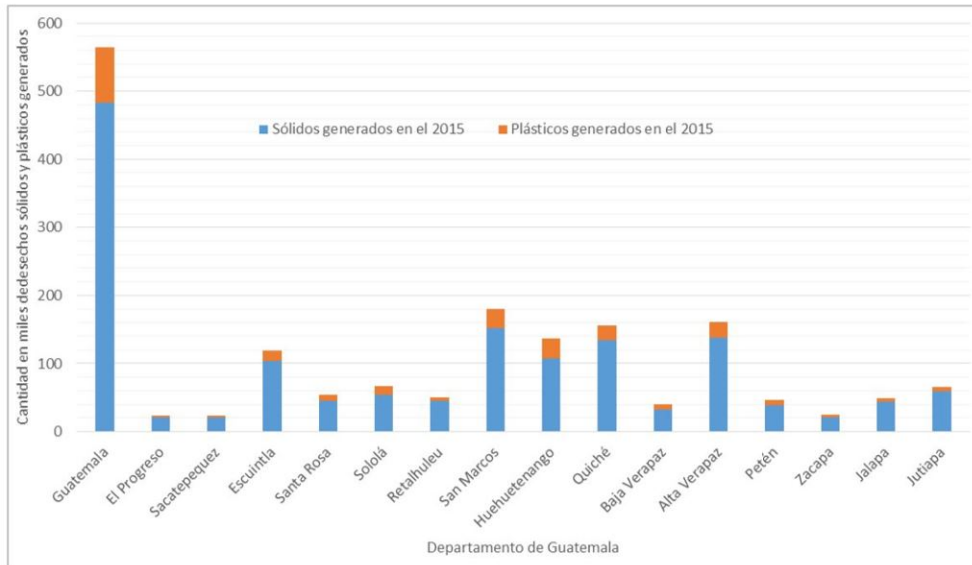


Figura 3: Desechos importantes en Guatemala para departamentos con valores significativos en el 2015 (Ortíz, 2017)

En la actualidad se realizan distintos proyectos para motivar a la población a un mejor manejo de los desperdicios sólidos producidos, pero es demasiada la cantidad de desechos sólidos y plásticos que se producen, debido a las necesidades de las personas de consumir productos con envase plástico. Un conteo aproximado determinó la cantidad de envases de tereftalato de polietileno (PET) que utilizan las personas, el cual varía de 1 a 2 envases por día, cabe mencionar que 20 botellas hacen la equivalencia de una libra de masa de PET. Otro valor esencial es la evaluación masa-volumen, en el cual un envase de agua de 1500 cm³ se asemeja a 37 - 39 gramos del tereftalato de polietileno. El mínimo peso con relación al del producto adquirido es cerca de 50 veces menos que el líquido contenido (el cual representa un importante en acarreo de mercaderías), por eso es económico y las personas tienen un mayor acceso a un producto con recipiente de tereftalato de polietileno (PET) que con uno de vidrio o aluminio, es por esto que el porcentaje de manejo de desechos sólidos en cada departamento de Guatemala y esencialmente el manejo de desechos plásticos son cantidades abundantes de desperdicio para las cuales las personas utilizan formas fáciles de eliminarlos, como quemándolos y produciendo gases dañinos a la salud y al medio ambiente; estos gases contaminan el aire produciendo enfermedades respiratorias a la población. Otro modo es tirándolos en la calle produciendo contaminación acentuando el volumen que ocupa (Ortíz, 2017).

7.2. Situación de las llantas en Guatemala

En Guatemala no existe un método de recolección de desechos sólidos especiales, como las llantas, por parte de las Municipalidades, del Ministerio de Medio Ambiente o de las empresas importadoras y distribuidoras de llantas, es por ello que las llantas se encuentran dispersas por todo el país, apiladas a la intemperie, generando puntos de concentración de

enfermedades al servir de hospederos a insectos transmisores de enfermedades o de criaderos de molestas plagas, que afectan la calidad de vida de los distintos poblados. Tampoco son aceptadas en la mayor parte de los basureros municipales ni en rellenos sanitarios, por el potencial peligro de incendios que representan y por el espacio que ocupan (Guevara, 2008).

Comúnmente las llantas como desecho se encuentran en el área urbana y en el área rural. Son muchos los usos que en Guatemala se les dan a las llantas una vez que finaliza su tiempo de utilidad, pero infortunadamente no son suficientes para reducir la creciente cantidad de llantas en desuso que se generan, además se debe considerar que tienen baja biodegradabilidad, es decir que, una vez utilizadas, su durabilidad o existencia es prolongada (Guevara, 2008).

7.2.1. Colocación terminal de las llantas en la ciudad.

Guevara (2008) menciona que en Guatemala, diariamente se desechan enormes cantidades de llantas que según estimaciones realizadas por la Comisión Nacional de Desechos Sólidos CONADES, son repartidos de la siguiente manera:

- 70 % vertederos, generalmente no autorizados.
- 15 % son reencauchados, por importadoras de llantas y en forma artesanal.
- 12 % son reciclados.

A continuación, se presenta un cuadro de las utilidades que se le da en Guatemala, a las llantas completas en desuso:

Cuadro 4: Desechos domiciliarios de sólidos y plásticos, generados en el 2015

Número de llantas	Proyectos realizados
1400	Impermeabilización de suelos (relleno y compactaciones con PET)
1500	Muros de contención (rellenas y compactadas con tierra)
30	Rotulación
150	Delimitación de área
50	Protección de árboles tipo maceta colgante
75	Maceta siembra de árboles
100	Camino peatonal
400	Vía de acceso para tractores (rellenas con piedras)
500	4 diques de contención de sólidos en Zanjón Malea
400	3 pozos de infiltración de 30 metros
40/ semana	Reencauche para suela de caites
450	Teja para galera
12	Casa para perros
100	Tubo de drenaje

(Guevara, 2008)

La estimación muestra la cantidad de llantas que ingresaron al país, como kilos de hule importados, de datos obtenidos de las declaraciones y formularios aduaneros de importación, brindados por el Banco de Guatemala, a través del Departamento de Estadísticas, debido a que no existe un registro de la cantidad de llantas que ingresan al país (Guevara, 2008).

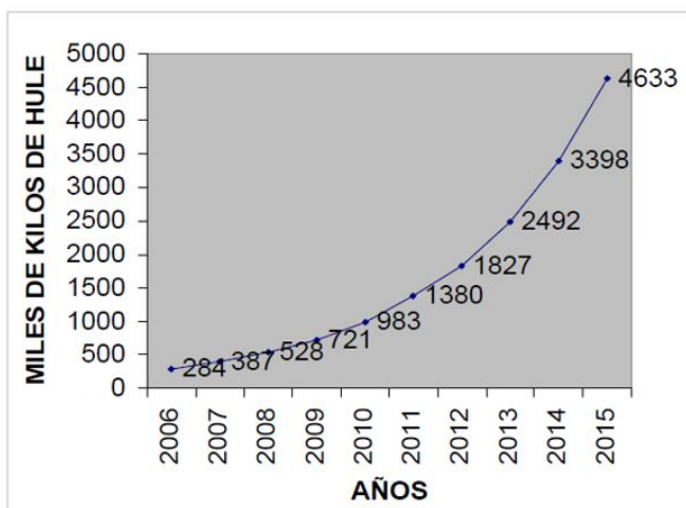


Figura 4: 10 años de neumáticos acumulados por importación de los años 2006 al 2015 (Guevara, 2008)

La estimación toma en cuenta, las importaciones, el ingreso de vehículos nuevos y usados tanto de vehículos livianos, transporte colectivo, industrial y agrícola, asumiendo que por vehículo liviano la cantidad de llantas que ingresan es de 5 como mínimo y un promedio de 9 llantas para vehículos pesados. Además, para vehículo liviano el tiempo útil para una llanta es de 3 años y de 5 años para vehículos pesados y la estimación en kilos de hule acumulados en 10 años por concepto de importaciones fue de: 4 633 164 miles de kilos en el año 2016, con una tasa de crecimiento del 36.34% anual. Tomando en cuenta que el peso promedio de las llantas para vehículos particulares es de 13 kg y de llantas comerciales de 55kg, solo para el año 2016 se desecharon un total de 4 633 toneladas de llantas (Guevara, 2008).

La cantidad de neumáticos importados es enorme, a pesar de que la Figura 4 no toma en cuenta las llantas que ingresan como usadas y reencauchadas de bajo costo, que no son registradas como importaciones que representan una porción importante. Además, el espacio que ocupan y la contaminación que producen es igual a la de una llanta tradicional, pero a menor plazo que una llanta reencauchada en el país. Desafortunadamente este tipo de llantas representan un negocio rentable y común en Guatemala. La falta de control legal y ambiental es la principal causa del aumento de la utilización de las llantas en desuso (Guevara, 2008).

7.3. Producción de agregados

7.3.1. Agregado mineral

Son aquellos agregados que tiene la combinación de roca partida, grava, arena, escoria u otro material que sea mineral, estos usualmente se unen con un medio ligante para crear concreto hidráulico o asfáltico, mortero, mastique, etc (Morales, 2015).

7.3.2. Agregados naturales

Estos materiales son aquellos que usan en su estado natural o que solo han sido triturados o lavados y clasificados. Según Morales (2015) existen algunos términos empleados para describirlos y clasificarlos, estos son los siguientes:

- **Mineral:** Elemento químico sólido que se encuentra naturalmente, o compuesto formado como un producto de procesos inorgánicos, que por lo general tienen estructuras cristalinas definidas y un conjunto de distintivos de propiedades físicas.
- **Roca:** Material sólido, compuesto de uno o más minerales que conforman la corteza terrestre. Los términos roca y piedra se usan a menudo como sinónimos.
- **Grava:** Material granular grueso, generalmente mayor de 1/4", proveniente de la meteorización y erosión de la roca por agentes naturales.
- **Grava partida:** Resultado de la trituración de la grava natural, en el que los fragmentos tienen una o más caras fracturadas.
- **Piedra partida:** Resultante de la trituración de fragmentos de bancos de roca o piedras grandes en que los fragmentos resultantes tienen todas las caras fracturadas y son de mayor de 1/4".
- **Arena:** Material granular fino, generalmente tienen un tamaño menor de 1/4", que resulta de la desintegración natural de la roca.

7.3.3. Agregados artificiales

Estos son los provenientes de materiales que han tenido cambios físicos y químicos. Hay dos tipos:

- Los productos derivados de procesos principales como la escoria o cenizas (Morales, 2015).
- Agregados manufacturados, estos son provenientes de materia prima, en el cual al final son procesados para poder utilizarlos (Morales, 2015).

7.3.4. Otros términos

Módulo de finura (FM)

Este es un valor que indica que tan grueso o fino es un agregado normalmente este se calcula sumando todos los porcentajes retenidos acumulados en cada uno de los tamices y el resultado se divide dentro de 100 (Morales, 2015).

Vacíos de los agregados

Comúnmente este término no se define correctamente ya que no se usa de forma adecuada, debido a que hay confusión entre vacíos de agregados y vacíos de una masa. El primero hace referencia a una característica que afecta la gravedad específica y la absorción de un material y el segundo se refiere a un sistema, este afecta a los diseños de concreto hidráulico y asfáltico (Morales, 2015).

7.3.5. Especificaciones

Los agregados o rocas por utilizar deben de tener la capacidad de resistir la capacidad destructiva del clima y del tráfico. Por lo tanto, es necesario verificar ciertas propiedades para garantizar que estas tengan la capacidad de resistir las exigencias a las cuales están sometidas. Entre las principales propiedades se puede mencionar la dureza que es la resistencia que proporciona la roca al movimiento de sus partículas superficiales por abrasión, tenacidad la resistencia a fracturas por impacto y sanidad es la capacidad de tolerar la acción del clima. Con el propósito de garantizar la calidad de los agregados o para determinar las características necesarias para el uso que se le dará y que estas funcionen correctamente, distintas instituciones han creado especificaciones, como la American Society for Testing Materials (ASTM) y la American Association of State Highway and Transport Officials (AASHTO). Estas entidades han generado diferentes especificaciones para una variedad de características que deben de tener los agregados. No es necesario realizar cada uno de estos ensayos para cada especificación, sino que solo se realizan las que se adecuan al uso que se les dará a los agregados (Morales, 2015).

Según Morales, 2015 las especificaciones deben de cumplir con cinco requisitos importantes:

- Exactitud y precisión
- Viabilidad
- Conveniencia
- Flexibilidad
- Aceptabilidad

Especificaciones locales y su importancia

Para empezar, resulta necesario tener en cuenta especificaciones que se adapten a cada zona del territorio nacional, pues, en primer lugar, los agregados pueden diferir de un lugar a otro, y en cuanto al clima, un material que se muestra deletéreo en una zona puede ser inocuo en otra. Por lo demás, cabe resaltar que tales especificaciones, más que un reglamento absoluto, deben ser una guía que oriente cada proceso, y, por lo demás, deben ser amplias y completas, precisamente por las características de cada lugar del país (Morales, 2015).

Requisitos de gradación

Aunque el clima y las condiciones locales también desempeñan un papel importante en cualquier tipo de construcción y en cualquier gradación, es importante resaltar que existe un sinnúmero de elementos comunes para las construcciones que posibilitan fijar parámetros para la granulometría suficientemente confiables (Morales, 2015). Por otra parte, se debe considerar que, por ejemplo, no es lo mismo una gradación aceptable para concreto hidráulico que una para las capas de base granular o para mezclas bituminosas, de allí que sea de vital importancia fijar adecuadamente los requisitos o límites de cualquier gradación. (Morales, 2015).

Requisitos de calidad

Que a su vez pueden ser dividirse en los siguientes cinco aspectos:

- **Requisitos generales:** De manera general, las especificaciones suelen comenzar con un párrafo que, aunque puede denominarse de diferentes maneras, contiene siempre las mismas generalidades. Así, una “descripción”, unas “características generales” o “requisitos generales”, siempre presentan el tipo de agregado junto con sus requisitos, que, aunque tienen influencia en la aceptabilidad del agregado, no muestran un método cuantitativo aceptable, por lo que tales requisitos se vuelven confusos (Morales, 2015)

Por ejemplo, un párrafo titulado “descripción” contendría lo siguiente”: “El agregado grueso estará compuesto de fragmentos limpios, tenaces y durables de caliza partida, grava triturada o sin triturar o escoria libre de piezas planas, alargadas, laminadas, débiles o desintegradas, y libres de fragmentos cubiertos con materia sucia o con otro material objetable” (Morales, 2015)

- **Resistencia a la abrasión:** Cualquier tipo de material, además de ser durable y tenaz, debe tener resistencia a la abrasión como característica esencial para un buen agregado. La dureza, entretanto, se constituye en gran medida como la resistencia a la abrasión, mientras que la tenacidad está asociada a la capacidad de un material de resistir la fractura al impacto (Morales, 2015).

Además, tanto el lugar de fabricación como tipo de agregado son factores que determinan en gran parte la variación en la pérdida máxima de un agregado u otro. Así, la pérdida máxima de resistencia de un agregado para concreto hidráulico no debe

superar el 50 %, mientras que uno usado para la rodadura del concreto asfáltico no debe superar una pérdida máxima del 40 % (Morales, 2015).

- **Sanidad:** La resistencia de un material a las limitaciones del clima es sin duda alguna un componente importante para escoger un material para la construcción de carreteras. Tal propiedad se conoce como sanidad. En Guatemala las condiciones climáticas no son especialmente fuertes, por lo que el daño que puedan tener estos agregados suele ser ocasionados por la fuerza del agua o por el humedecimiento y secamiento del material. Al respecto, los requisitos de sanidad para agregados gruesos y finos se basan en ensayos realizados con sulfato de sodio o magnesio. Sin embargo, tales pruebas no han servido para distinguir entre los agregados sanos de los que no lo son, por lo que investigadores estadounidenses recomiendan usar tales pruebas con fines de aceptación del agregado, pero no para rechazar este (Morales, 2015).
- **Restricciones de las sustancias deletéreas:** Otro de los requisitos de gradación tiene que ver con las restricciones impuestas a las sustancias deletéreas entre las que se encuentran las bolas de arcilla, el linguito, carbón, partículas blandas y livianas, y materiales incluso más finos que el tamiz. Para el uso de agregados diferentes al concreto hidráulico estas restricciones no son especialmente estrictas, pues estas sustancias deletéreas no se presentan en todos los lugares y aún más, materiales deletéreas con el mismo nombre pueden surtir efectos distintos dependiendo del tipo de concreto (Morales, 2015).

Por otra parte, las especificaciones para concreto asfáltico no incluyen de manera amplia restricciones de sustancias deletéreas, sino que simplemente se limitan a indicar que tales agregados deben tener piezas durables, duras y fuertes, y libres de cualquier revestimiento indeseable, caso contrario a lo que sucede con el concreto hidráulico, fuertemente afectado por sustancias y materiales de este tipo (Morales, 2015).

- **Requisitos especiales:** Cuyos rasgos pueden enumerarse en una lista en donde a veces se agregan límites cuantitativos. Según Morales (2015) algunos de estos son:
 - Enunciados que limitan la presencia de piezas planas o alargadas en el agregado grueso.
 - Para ilustrar este enunciado se puede pensar en un agregado que ha cumplido con todos los requisitos de especificación, pero que ha mostrado con anterioridad un comportamiento pobre en el terreno. Por otro lado, puede haber un enunciado permisivo, tal como uno que diga que aun si el agregado falla en alguno de los requisitos puede ser aceptado si ha tenido un servicio satisfactorio en el pasado.
 - De forma similar, si se planea usar una mezcla asfáltica esta debe cumplir con un porcentaje mínimo de fractura y someterse a una prueba de adherencia.
 - Por último, es de anotar que la escoria de los altos hornos debe cumplir con un peso mínimo.

Uso de los agregados en las obras viales

Estos agregados son absolutamente necesarios para la construcción de obras viales.

Los agregados para obras viales pueden usarse de diferentes formas, ya sea solos o con aditivos como cemento, y pueden, además, constituir mezclas asfálticas o de concreto hidráulico (Morales, 2015).

No obstante, un agregado solo puede emplearse como subbase o base de un pavimento flexible o rígido de altísima calidad, o como una superficie de rodamiento de una carretera de bajo costo. Es con base en este tipo de usos que se establecen las diferentes especificaciones y exigencias para la gradación, tales como la dureza, la tenacidad, la resistencia y la forma de las partículas (Morales, 2015).

7.3.6. Origen de los agregados

Aunque en un principio cualquier fuente de agregados minerales provino de los bancos de roca, en la actualidad la piedra partida, la arena y la grava poseen distintas fuentes de origen (Morales, 2015).

La escoria, por ejemplo, es un subproducto de la producción de acero en los altos hornos y, por tanto, se consigue en regiones altamente industrializadas, mientras que materiales como la grava y la arena, de forma predominantemente redondeada, son el resultado de la acción abrasiva del agua en los materiales rocosos y de su transporte y posterior depósito en las corrientes de esta. De allí que sea posible encontrar este tipo de material en cauces, vegas de ríos, playas y lagos, así como en depósitos aluviales (Morales, 2015).

En cuanto a las rocas, debe decirse que estas se dividen en tres clases diferentes: las ígneas, por su lado, provienen del magma fundido, mientras que las sedimentarias se caracterizan por ser el producto de la fragmentación de otras rocas, y las metamórficas, que son rocas ígneas o sedimentarias que se han transformado de acuerdo con la mineralogía o la presión de calor, o incluso por ambas (Morales, 2015).

Las rocas ígneas se dividen a su vez en dos clases: extrusivas e intrusivas.

Las rocas extrusivas, de un lado, son producto del magma obligado a salir a la superficie de la tierra y luego enfriado. Estos flujos de lava se llaman comúnmente basalto, aun cuando mineralógicamente hablando puede haber varios tipos de lava. En general, el grupo de rocas basálticas es de color oscuro, de estructura columnaria y de grano fino. Las rocas intrusivas, por el contrario, no alcanzan la superficie, excepto por erosión posterior y por tanto se han enfriado lentamente bajo presión y son de textura cristalina, como la obsidiana (Morales, 2015).



Figura 5: Granito tipo de roca ígnea
(Tarbuck & Lutgens, 2005)

Asimismo, dentro de las rocas sedimentarias existen otras subdivisiones, hallándose rocas de tipo caliza, areniscas o pizarras. Por lo demás, estas reciben su nombre debido a que se depositan como sedimentos (Morales, 2015).

Las rocas ígneas y sedimentarias pueden derivar en rocas de tipo metamórfica a partir de la transformación de su contextura producida por condiciones mineralógicas o de presión. Una de las características de mayor relevancia de la metamorfosis, es que las rocas se fortalecen, de manera que el mármol es más fuerte que la caliza y la cuarcita es más durable que la arenisca (Morales, 2015).

Además, al depositarse por capas las rocas sedimentarias presentan cambios verticales frecuentemente. Asimismo, una formación sedimentaria dentro de una cantera puede ser de composición maciza y uniforme, o bien, puede ser estratificada y estar compuesta a su vez por diferentes tipos de roca. Por ejemplo, las calizas pueden estar intercaladas con pizarras, las areniscas con esquistos limosos y las cuarcitas con dolomitas. La estratificación puede ser suave o pronunciada y las capas gruesas o delgadas. Cuando las capas son delgadas, su espesor controla el tamaño del agregado producido y una estratificación pronunciada puede causar la producción de agregados con piezas planas o alargadas (Morales, 2015).

Los estratos individuales pueden ser duros o blandos, agrietados o sin fracturas. Pueden existir esquistos minerales indeseables, embebidos en los estratos de roca (Morales, 2015).



Figura 6: Conglomerado tipo de roca sedimentaria
(Tarbuck & Lutgens, 2005)



Figura 7: Cuarzita tipo de roca metamórfica
(Tarbuck & Lutgens, 2005)

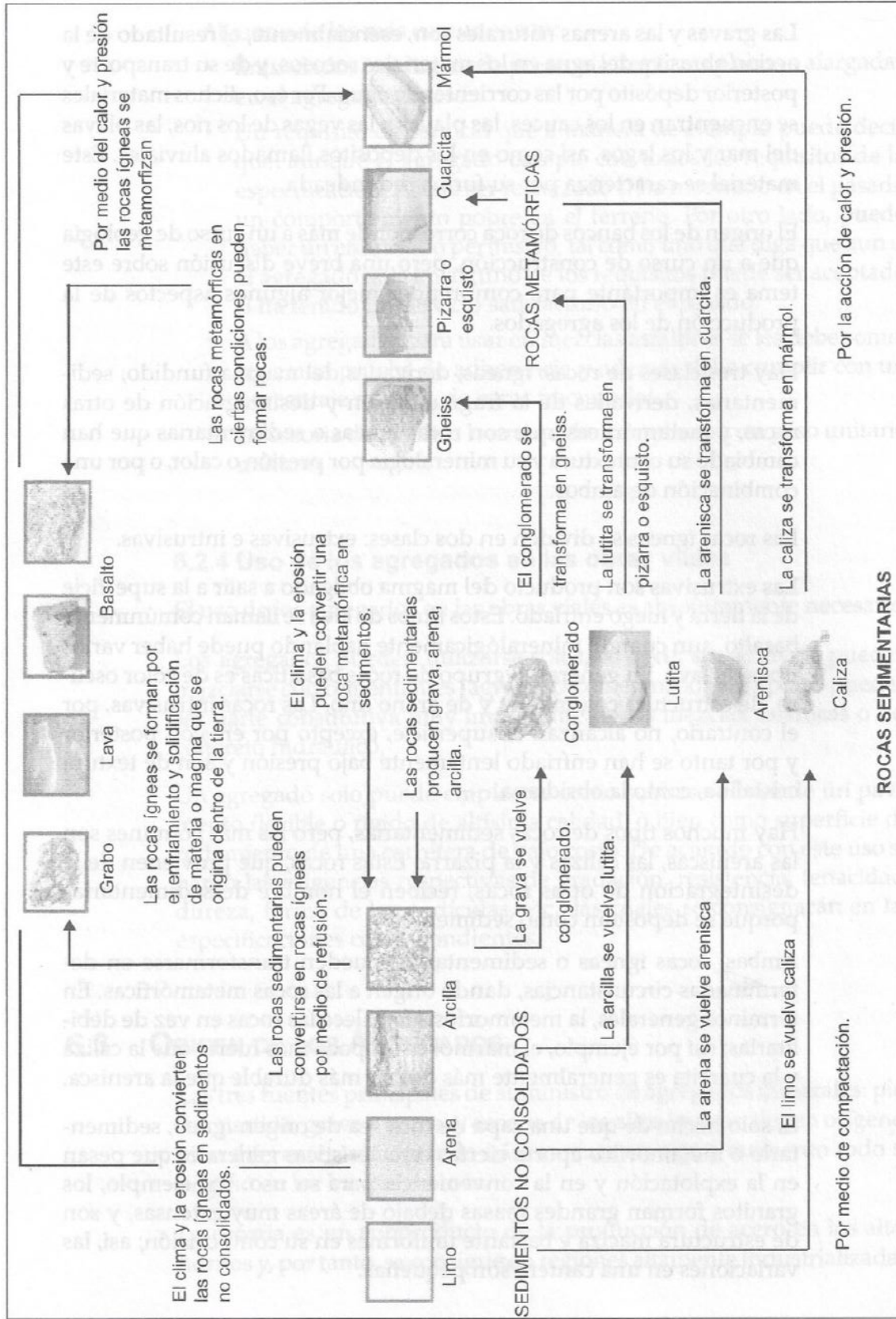


Figura 8: Ciclo de las rocas (Morales, 2015)

Por otra parte, es posible que la explotación de una veta particular se torne difícil en tanto las rocas sedimentarias y las lavas pueden estar mezcladas, o bien, que se presente una variedad diferente de roca en algún frente de la misma cantera. A su vez, es posible que las rocas presenten una pseudoestratificación, aunque las rocas sean uniformes en composición y en extensión, de forma que las capas sean la mayoría de las veces diferentes mineralógicamente o estén tan deformes físicamente que no se pueda producir un determinado tipo de roca (Morales, 2015).

Tales características pueden aplicarse al proceso de trituración del material, por lo que, por ejemplo, la cristalización gruesa del granito significa casi siempre una estructura interna débilmente trabajada que puede ocasionar una cristalización gruesa de este material cuando se tritura. La caliza, por el contrario, es fácilmente triturable en tanto sea densa y pura, sin embargo, si está fracturada o es altamente arcillosa puede producir un exceso de finos. De igual forma, una arenisca se puede triturar bien dependiendo de la cantidad de base cementante que mantiene unidos los granos. Estas características, que son inherentes a las rocas, poseen una importante influencia a la hora de determinar la factibilidad de la explotación de estas, prescindiendo la mayoría de las veces de la adaptabilidad para el uso en agregados (Morales, 2015).

A su vez, los depósitos de arena y grava son producto de la meteorización y erosión de los mantos de roca, haciendo que los materiales que componen estos depósitos posean también características propias del manto rocoso y siendo sometidos, además, a los mismos procesos de alteración. No obstante, la gran diferencia entre un depósito y los materiales que lo componen está en los agentes que transportan estos últimos, responsables de otorgar determinadas características que pueden mejorar o dañar la calidad del agregado debido al acarreo desde el punto de origen hasta el sitio de depósito (Morales, 2015).

Un depósito aluvial, por ejemplo, posee una heterogeneidad en las rocas debido las diversas fuentes de donde proviene este, haciendo que las rocas de este tipo de depósito sean diferentes a las que se encuentran en una cantera. De otro lado, el proceso de acarreo y depósito incluye todo tipo de abrasiones y alteraciones que se ser prolongadas, destruyen todo el material, excepto las partículas más fuertes. Incluso, estas partículas fuertes pueden convertirse paulatinamente en débiles si el proceso de transporte y depósito es lo suficientemente extenso (Morales, 2015).

En consecuencia, las características de un depósito de arena y grava están dadas por el tipo de rocas y más aún, por la severidad y la clase de transporte, así como la resistencia de la roca. Asimismo, debido al agrietamiento, las fracturas y los planos de estratificación, la roca partida y meteorizada puede ser más o menos de proporciones uniformes, y la arena y la grava depositadas aguas abajo pueden mostrar variación considerable en composición en diferentes fracciones de tamaños (Morales, 2015).

Sin embargo, pese a las condiciones de transporte y depósito, la composición de arena y grava bien puede volverse uniforme paulatinamente a través de la abrasión y la trituración continua, y, además, pueden variar de una estación a otra con lo que en el transcurso de tiempo los materiales transportados pueden cambiar de forma radical. Tal información permite concluir que no se debe afirmar ni presumir que los depósitos dejados en diferentes períodos y en distintos sitios sirvan de la misma manera para su uso en construcción (Morales, 2015).

Tras ser depositado todo el material, los agentes climáticos alteran las partículas individuales, y con ayuda del agua subterránea forma recubrimientos en las rocas. A su vez, estas partículas pueden cementarse, por un lado, por la acción de rocas silíceas o calcáreas, o, de otro lado, pueden formarse capas de caliche o fondo rocoso (Morales, 2015).

Finalmente, y de acuerdo con lo descrito anteriormente, es posible concluir que buena parte de las características de las rocas como la tenacidad, la porosidad, la solidez o la densidad son inherentes a la naturaleza de estas, por lo que no se puede cambiar, mientras que otras cuantas son producto de procesos como la granulometría, que también puede mejorar potencialmente dichas características (Morales, 2015).

7.3.7. Propiedades de los agregados

La conveniencia del uso de diferentes agregados en el campo de la ingeniería está determinada, además de su gradación, por un conjunto de propiedades físicas y químicas. En consecuencia, el conocimiento de tales propiedades resulta de vital importancia para futuros ensayos empíricos y para el establecimiento de diferentes límites de especificaciones. Asimismo, entender a cabalidad estas propiedades puede proporcionar una evaluación y selección adecuada de los agregados teniendo en cuenta las condiciones específicas de servicio (Morales, 2015).

Cabe resaltar que el origen de tales propiedades fisicoquímicas se encuentra en la historia geológica (formación de rocas y meteorización) de la formación rocosa, así como en el proceso al que se someten los materiales de producción en los agregados terminados (Morales, 2015).

La composición mineralógica, así como la estructura y la textura interna de las partículas de agregado influyen en gran medida en la aparición de las propiedades fisicoquímicas de los distintos tipos de roca. Se entiende la textura interna como el tejido que une los granos o las masas amorfas y que depende del tamaño, la composición, la distribución y las relaciones de espacio mutuo entre los cristales que componen las partículas de la roca. La estructura interna, por otra parte, hace referencia a la distribución de las discontinuidades dentro de las partículas del agregado. Su vez, algunas estructuras típicas de las rocas son la estratificación y las concreciones de las rocas sedimentarias, así como las franjas de flujo presentes en las rocas ígneas. También son ejemplos de estructuras internas los clivajes pizarrosos y la esquistosidad en las rocas metamórficas; las fracturas y venas y canales que pueden ocurrir en cualquier roca (Morales, 2015).

Entretanto, las partículas de roca están constituidas por cristales minerales que han crecido en el sitio, o por fragmentos de cristales y de rocas que se han depositado de manera individual. Las masas amorfas como el vidrio volcánico o el opal, solidificadas a partir del derretimiento de la roca, son también componentes constitutivos de las partículas de roca. Así entonces, las areniscas tienen una textura granular que bien puede ser abierta o cerrada, mientras que la estructura interna puede ser de carácter masiva o estratificada, siendo sus componentes cualquier tipo de mineral o roca (Morales, 2015).

Como resultado de su estructura interna, textura y composición, cada roca y cada partícula mineral posee una serie de propiedades fisicoquímicas que controlan la contribución que la partícula hace a las cualidades ingenieriles del agregado. Estas propiedades determi-

nan la utilidad como material para carreteras, o la durabilidad de un concreto hidráulico o asfáltico. Las propiedades físicas incluyen esas cualidades de un agregado que influyen en su utilidad para el uso en procesos mecánicos en contraste con los procesos químicos. Por lo demás, las propiedades químicas aluden a aquellas propiedades que, por medio de procesos químicos que involucran soluciones o interacciones entre los componentes, pueden afectar la estructura o textura del agregado y su utilización (Morales, 2015).

Propiedades físicas

De vital importancia para la ingeniería, según Morales (2015) algunas de las propiedades físicas de los agregados son:

- **Porosidad, permeabilidad y absorción:** El tamaño, la abundancia y la continuidad de los poros influyen significativamente en algunas cualidades como la resistencia, la elasticidad, la dureza, la textura superficial y la gravedad específica, así como la adherencia, la resistencia a la acción del clima y la velocidad y magnitud de las reacciones cemento-agregado, de manera que las características internas de los poros es la propiedad física más importante de los agregados.
- **Textura superficial:** Compuesta por la trama o el patrón y la rugosidad o lisura de una partícula relativas de la periferia. Abarca además todos los rasgos físicos de los bordes y sus dimensiones, así como los detalles de la forma de la superficie (plana, curva o rugosa). Además, la textura de la superficie depende en gran manera de la composición mineralógica de la partícula y de los procesos naturales o artificiales producto de la abrasión a la que ha sido sometida la roca. Por último, esta propiedad influye en la adherencia desarrollada entre el agregado y el cemento asfáltico, si trata, claro, está, de concreto asfáltico.
- **Propiedades térmicas:** Por lo general, las propiedades térmicas de los agregados no son un elemento esencial en la construcción de carreteras, de manera que este tipo de propiedades no son influyentes en los pavimentos asfálticos ni en los materiales usados como bases o subbases.
- **Resistencia y elasticidad:** Resistencia alta y elasticidad son necesarias en los materiales para usar en carreteras porque la velocidad de desintegración se minimiza y la estabilidad de la capa compactada es máxima. En el concreto, las partículas de piedra y arena que queden cerca de la superficie se pueden debilitar seriamente por la acción del clima, aunque el interior de los granos no se modifica en forma significativa. La resistencia y la elasticidad del agregado no se reflejan proporcionalmente en la resistencia o elasticidad del concreto.
- **Resistencia y elasticidad:** Una alta resistencia y elasticidad son de gran importancia para la elaboración de materiales usados en carreteras, ya que la velocidad de desintegración se minimiza y la estabilidad de la capa compactada se potencia al máximo. En el caso del concreto, las partículas que queden cerca de la superficie pueden debilitarse por la acción del clima, aunque en el interior las partículas no se modifiquen significativamente. Por último, cabe destacar que la resistencia y elasticidad del agregado no son proporcionales a la resistencia o elasticidad del concreto.

Entretanto, un factor de gran relevancia en la resistencia y elasticidad del agregado es el grado al cual las partículas se fracturan internamente, ya sea por causas naturales o por causa del proceso de trituración en la manufacturación del agregado. Así, las fracturas contribuyen a la rotura de las partículas durante la fragmentación de la superficie de los pavimentos asfálticos.

- **Densidad:** Es una propiedad que depende de la densidad propia de los minerales que constituyen la roca, así como de la porosidad de esta. La densidad de una partícula de agregado depende de la densidad propia de los minerales que lo constituyen y de la porosidad. Por otro lado, la densidad del material depende esencialmente del volumen de poros incluidos en su totalidad. En términos de Bulk, la densidad puede ser aparente o verdadera.
- **Dureza:** La resistencia de un agregado a la abrasión y a la degradación está controlada por la dureza de los minerales constituyentes, la firmeza con que los granos individuales están cementados o entrelazados y la frecuencia de las fracturas. Las partículas compuestas de minerales de un grado bajo de dureza pueden llamarse "blandos"; aquellos que se desintegran fácilmente por la pobre cementación o por la intensidad de la fracturación pueden denominarse débiles. Las partículas blandas o débiles son objetables por que se rompen durante el proceso, cambiando la gradación del agregado, y son susceptibles de continuar la desintegración durante el servicio como resultado de impactos, abrasión y acción del clima.
- **Forma de las partículas:** La forma de las partículas del agregado puede afectar significativamente su comportamiento. La trabajabilidad del concreto, la resistencia, la demanda de asfalto, y la trabajabilidad de las mezclas asfálticas, la fricción entre las partículas en una mezcla, son unos pocos ejemplos de la influencia de la forma de las partículas en la calidad del agregado.

Por otro lado, tanto la forma como el tamaño de las partículas dependen de la presencia y el esparcimiento de grietas y resquebrajaduras en la formación matriz. Debido a esto, algunas formaciones producen formas más o menos equidimensionales planas o alargadas en cierto rango de tamaños, en este sentido, no es posible una producción importante de agregados que posean determinados tamaños provenientes de ciertas fuentes. Asimismo, el tamaño de estas partículas depende de la resistencia relativa, la resistencia a la abrasión y la elasticidad, y de los procesos naturales o artificiales mediante los cuales se produce el agregado. Al respecto, es posible encontrar determinados tipos de roca y mineral en un agregado representados en partículas subangulares o redondeadas, mientras que otras partículas en la misma muestra de agregados presentan formas angulares.

En cuanto a la forma de las partículas, estas son controladas por dos propiedades de relativa independencia: la esfericidad, definida por la relación entre el área superficial de la partícula y su volumen o el volumen relativo de la partícula y la esfera circunscrita. La redondez, entretanto, está determinada por la angularidad o agudeza relativas a las aristas y esquinas de las partículas.

- **Recubrimientos:** Se refiere a una capa de sustancia que cubre parcial o totalmente la superficie de una partícula. Puede ser de origen natural como sucede con los depósitos de grava y arena, o bien, este recubrimiento puede darse de forma artificial, como por ejemplo el polvo resultante de la trituración y manejo de la piedra. La diferencia entre

ambos está en que, a diferencia del recubrimiento natural, que no cubre por completo la superficie de la roca, el recubrimiento artificial sí lo hace. El recubrimiento puede estar compuesto de diferentes materiales como la arcilla, el carbonato de calcio, la materia orgánica, el limo, entre otros.

A su vez, tales recubrimientos pueden ser inertes o potencialmente deletéreos desde el punto de vista químico, aunque físicamente muchos de estos sean débiles y pobremente adheridos a las partículas de agregados, aunque sean porosos y absorbentes. En tales condiciones, los recubrimientos pueden afectar gravemente la calidad de un agregado destinado para un determinado uso.

Propiedades químicas

- **Solubilidad:** Las rocas, gravas o arenas que se consideran útiles para la elaboración de agregados deben contener mínimamente una proporción suficiente de sustancias solubles en agua que afecta la calidad de estos. Estas sustancias, además, pueden ser identificadas a través de exámenes petrográficos o ensayos químicos (Morales, 2015) .
- **Oxidación hidratación, carbonatación:** Algunos minerales inestables son susceptibles de oxidarse, hidratarse o carbonatarse al quedar expuestos a la atmósfera (Morales, 2015).

7.4. Caucho reciclado de llantas

7.4.1. Grano de caucho reciclado

Este material es producto de las llantas recicladas que, por lo general, no tienen un destino ni un control ambiental determinado o estricto, pudiendo terminar la mayoría de las veces en rellenos sanitarios, plantas térmicas o basureros a cielo. El grano de caucho reciclado se produce a través de la molienda de llantas usadas, y es utilizado en distintas obras de ingeniería civil como rellenos de terraplenes, pisos de parques, materiales de contención, como modificador de mezclas asfálticas, entre otros. Además, una de sus principales características es su tendencia a ablandarse y expandirse a medida que reacciona con el asfalto, y el bitumen espeso que se produce cuando se agrega las mezclas, generado por una mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación de este material (Díaz & Castro, 2017).

7.4.2. Composición de las llantas

El acero, la fibra textil, y el caucho natural o sintético son los tres principales materiales de los que están compuestas las llantas. El caucho, a su vez, se compone de polímeros (compuestos químicos de elevado peso molecular) como el polisopreno sintético, el estireno-butadieno y el polibutadieno, que además se usan para procesos que incluyen hidrocarburos (Díaz & Castro, 2017).

Los elastómeros, por su parte, son polímeros que muestran comportamientos elásticos y cuyas dimensiones cambian al aplicárseles tensión, dependiendo del rango elástico del

material. Su uso se expandió durante el siglo XIX, cuando se fabricaban neumáticos para automóvil. Algunos ejemplos de este material son el caucho sintético, el caucho natural, el caucho nitrilo, las siliconas, el neopreno, ente otros (Díaz & Castro, 2017).

Así, los cauchos naturales, polímeros elásticos surgidos de la emulsión del látex en la savia de algunas plantas, y los cauchos sintéticos como el SBR y el SBS constituyen la materia prima de las llantas (Díaz & Castro, 2017).

No obstante, el caucho sintético, un elastómero con propiedades mecánicas que le permiten sufrir mayores deformaciones bajo tensión respecto a otros materiales, es usado con mayor frecuencia debido a su bajo costo y a sus amplias y grandes propiedades, reemplazando el caucho natural cuando es necesario mejorar las propiedades de los materiales, siendo el estireno-butadieno el elastómero con mayor resistencia al desgaste y mayor generación de calor (Díaz & Castro, 2017).

Cuadro 5: Características y composición de las llantas, estos valores pueden cambiar dependiendo del tipo de llanta, el fabricante o país

Automóviles y Camiones		Camiones y microbuses	
Caucho natural	14 %	Caucho Natural	27 %
Caucho sintético	27%	Caucho sintético	14%
Negro de humo	28%	Carbón negro	28%
Acero	14 - 15%	Acero	14 - 15%
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 - 17%	Fibra, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 - 17%
Peso promedio:	8,6 Kg	Peso promedio:	45,4 Kg.
Volumen	0,06 m ³	Volumen	0,36 m ³

(Díaz & Castro, 2017)

Por otro lado el GCR posee componentes que pueden contribuir al buen desempeño del asfalto, según Díaz y Castro (2017) estos son:

- **Negro de humo:** Es un coadyuvante que impide o reduce el desgaste de las llantas cuando entran en contacto con la superficie del pavimento, aumentando de esta forma la duración de la llanta de los vehículos automotores. Respecto a la mezcla asfáltica, el negro de humo ha demostrado tener capacidad para aumentar las propiedades de refuerzo y disminuir el envejecimiento.
- **Antioxidantes:** Retardan el deterioro del caucho por oxidación.
- **Aminas:** De gran relevancia dentro de los componentes de los neumáticos, evitan el aumento de la fragilidad del caucho a la vez que reducen el endurecimiento progresivo y la pérdida de elasticidad.
- **Aceites aromáticos:** Prolongan la vida de las mezclas asfálticas modificadas con GCR.

7.4.3. Procesos de obtención del grano de caucho reciclado

En primer lugar, el objetivo de estos procesos consiste en que las partículas de GCR se encuentren libres de acero, fibra, u otros productos que afecten de manera negativa la calidad del material. Asimismo, otro de sus propósitos es lograr que las partículas lleguen a un tamaño máximo de $\frac{1}{4}$ ". Finalmente, es de especial importancia que aspectos como los costos sean tenidos en cuenta a la hora de escoger una forma de molienda, entre las que se encuentran las siguientes (Díaz & Castro, 2017).

Proceso de molienda a temperatura ambiente

En este método de tipo mecánico se busca reducir el tamaño del hule con el fin de utilizarlo en diferentes aplicaciones. La primera fase implica cortar las llantas en pedazos grandes con cuchillas atadas a un rotor, obteniendo partículas entre los 1.5 y 2 mm. La segunda fase de este proceso, de otro lado, incluye maquinaria que corta los pedazos obtenidos en piezas aún más pequeñas que van desde los 4.75 mm hasta los 425 micrones (tamiz n° 4 a n° 40) (Bernhard, 2009).

Posteriormente se retira magnéticamente del hule cerca de un 15 % de material metálico, y por medio de tamizadores se separa aproximadamente un 15 % de nylon y fibra de vidrio contenida en el hule. El metal separado, por otro lado, puede ser reciclado (Bernhard, 2009).

Si el hule se encuentra completamente libre de metal y fibras, entonces puede ser molido nuevamente para obtener piezas aún más pequeñas usando agua. Estas nuevas piezas pueden medir menos que 425 micrones. Sin embargo, este método ocasiona un aumento de la temperatura del hule, lo que puede generar a su vez una combustión inesperada en pilas de almacenamiento de mucha altura. La Figura 9 muestra un ejemplo de una línea de producción utilizando este método. En este caso, se utilizan imanes entre los procesos de molienda para retirar el acero de los neumáticos (Bernhard, 2009).

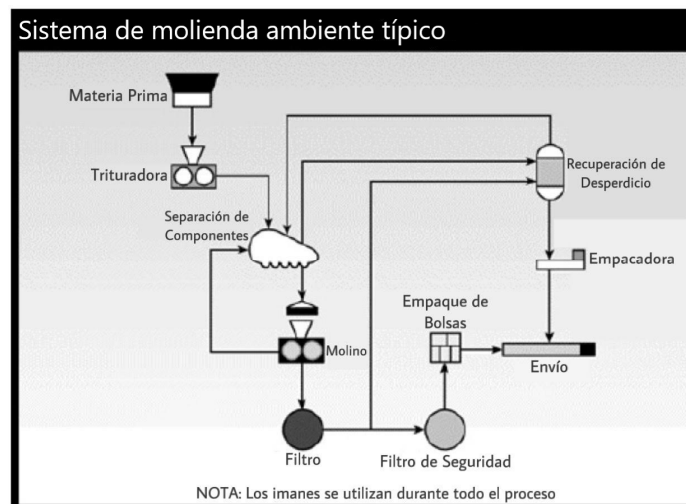


Figura 9: Proceso de molienda a temperatura ambiente (Díaz & Castro, 2017)

Proceso criogénico

Para este proceso la llanta es sumergida en nitrógeno líquido, y luego de que el hule se vuelva frágil debido a la congelación, se retira por medio de golpes a la estructura metálica de la llanta, y luego, las partículas resultantes del proceso pueden ser molidas para obtener diferentes tamaños según la aplicación o el uso requerido. Pese a su elevado costo, las plantas nuevas han optado en los últimos tiempos por este sistema debido a que no requiere tantos procesos intermediarios para la molienda de la llanta (Bernhard, 2009).

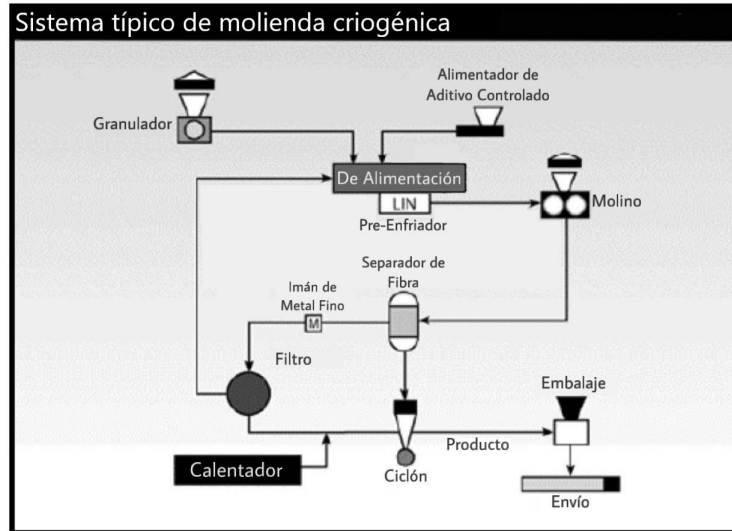


Figura 10: Proceso de molienda a temperatura ambiente
(Díaz & Castro, 2017)

Otros procesos

La utilización de otros procesos tiene como fin producir granos finos a través de una molienda húmeda, requiriendo una segunda etapa para producir partículas tamiz 40 y 60 o por encima de este número. A este proceso se le conoce como micromolienda y en él las partículas diminutas de caucho son reducidas a un tamaño mucho menor usando dos ruedas muy juntas en medio de un líquido que la mayoría de las veces es agua (Díaz & Castro, 2017).

7.4.4. Métodos de adición de GCR en las mezclas asfálticas.

Existen dos vías para adicionar grano de caucho reciclado al pavimento que conllevan beneficios fisicoquímicos a estos, dependiendo de la forma escogida (Díaz & Castro, 2017).

Vía húmeda

Esta tecnología genera un producto conocido como “asfalto modificado con caucho” o “asfalto-caucho” cuyo principal beneficio es aumentar la viscosidad del cemento asfáltico dándole unas características particulares. Además, la plasticidad de esta mezcla disminuye en temperaturas altas, lo cual es un punto a favor para evitar fenómenos como el ahuellamiento. En bajas temperaturas, la flexibilidad de la mezcla aumenta, lo que significa una mejor respuesta frente a posibles fisuras (Díaz & Castro, 2017).

De otra parte, diferentes factores deben ser tenidos en cuenta en este proceso en tanto son decisivos para la obtención del “asfalto-caucho”, tales como el tamaño, la textura, y la proporción del CGR. El tipo de cemento asfáltico, el tiempo y la temperatura de mezclado, así como el grado de agitación mecánica, el uso de aditivos y el componente aromático son además elementos clave en este proceso (Díaz & Castro, 2017).



Figura 11: Proceso de adición de caucho vía húmeda (Díaz & Castro, 2017)

En la Figura 11 muestra el proceso conocido como McDonald que consta de un tanque en donde se mezcla el cemento asfáltico con el GCR con ayuda de una serie de tornillos sin fin para asegurar la circulación de esta mezcla y lograr a su vez una reacción óptima durante un período que va de los 45 a los 60 minutos. Paralelamente se calientan los agregados pétreos para mezclarlos luego con el cemento asfáltico modificado y transportarlo al lugar de construcción a una temperatura que varía entre los 160 y los 190°C con el fin de que el material no pierda sus propiedades mecánicas ni su manejabilidad (Díaz & Castro, 2017).

Vía seca

El proceso seco implica la mezcla del grano de caucho reciclado con agregados antes de agregar el cemento asfáltico a la mezcla. A diferencia del proceso húmedo, este tipo de mezcla tiene grandes inconvenientes técnicos. La falta de estándares de calidad y el rendimiento

inconsistente ha dado como resultado la desconfianza para los investigadores y profesionales en aceptar este tipo de modificación, por lo cual se inclinan por el proceso por vía húmeda, a pesar de que tiene el potencial para reciclar más polvo de GCR (Díaz & Castro, 2017).



Figura 12: Proceso de adición de caucho vía seca (Díaz & Castro, 2017)

En este proceso el GCR sustituye entre el 1 y el 3% del peso total de los agregados, y se aplica antes de que estos últimos alcancen una temperatura específica. Por lo demás, en este proceso no se requiere ningún equipo especial para realizar la mezcla ya que el GCR se mezcla con los agregados de manera directa, y en algunos casos, las partes más diminutas del GCR modifican el cemento asfáltico (Díaz & Castro, 2017).

7.4.5. Ventajas y desventajas del GCR

Díaz y Castro (2017) señalan que los asfaltos modificados con GCR obtienen las siguientes ventajas:

- Mezclas más resistentes a los fenómenos de fatiga y ahuellamiento.
- Aumenta la resistencia al envejecimiento y oxidación del ligante asfáltico.
- Aumenta la resistencia de la mezcla al agrietamiento por bajas temperaturas.
- La mezcla asfalto-caucho es más flexible a bajas temperaturas y a altas temperaturas es menos plástica, es decir, es menos susceptible a los cambios de temperatura.
- Aumenta la resistencia a la humedad.
- Aumento de la elasticidad del ligante.
- Mejora las propiedades reológicas del asfalto. Estas mejoras se traducen en un ligante asfáltico con mayor rigidez (módulo viscoelástico) y menor ángulo de fase (comportamiento elástico).

- Mezclas más durables y por lo tanto con menor necesidad de mantenimiento.
- Ayuda a disminuir el impacto ambiental negativo que producen las llantas usadas.
- Mejora la resistencia al deslizamiento.

Sin embargo, de acuerdo con Díaz y Castro (2017), el GCR también presenta una serie de desventajas, pese a que la mayoría de las veces resulte ser atractivos y de gran funcionalidad. Tales desventajas deben ser estudiadas a profundidad puesto que su aplicación puede ocasionar problemas en los pavimentos. Algunas de estas desventajas son:

- El incremento de la viscosidad genera un aumento en la temperatura de fabricación en planta y extensión en obra de la mezcla asfáltica modificada lo que genera una mayor dificultad y complejidad a la hora de construirla *in situ*.
- En planta, la modificación del CA con el GCR se realiza a temperaturas entre 180-200°C, lo que genera la necesidad de mayor energía para la fabricación de la mezcla.
- Requiere de equipo especial para mezclar el asfalto con el GCR y almacenarlo, lo que incrementa el costo inicial de la mezcla.

7.5. Tereftalato de polietileno

7.5.1. Definición

El tereftalato de polietileno (PET) es un tipo de poliéster que contiene alto peso molecular. Es, además, uno de los materiales más utilizados para la fabricación de botellas. Es importante resaltar que las nuevas tendencias tecnológicas adelantaron el proceso de soplado de envases, por lo que el material se volvió aún más competitivo comercialmente. Las características y propiedades de barrera de la resina tereftalato de polietileno (PET) son progresivamente mejoradas por medio de la aplicación interna o externa de revestimientos aprobados para no contaminar el medio ambiente, y reemplazando el uso del vidrio y de envases de metal (Ortíz, 2017).

Por otro lado, en la elaboración de este polímero no se generan tantos desperdicios y su composición química permite cierto grado de regeneración (Ortíz, 2017).

7.5.2. Degradación y reciclaje del PET

El PET es un material resistente a la biodegradación debido a la alta cristalinidad de sus componentes y moléculas. En este sentido, este polímero se considera no biodegradable (su período de descomposición está entre los 100 y los 1000 años). No obstante, la biodegradación de este material se puede lograr por medio de un proceso químico que cambia la estructura molecular de este para luego reutilizarlo en un nuevo producto (Ortíz, 2017).

Este proceso consiste en exponer el material al medio ambiente para que la luz ultravioleta que genera el sol genere la energía que permite la incorporación de oxígeno en sus moléculas, de manera que el PET pueda volverse frágil y las cadenas poliméricas alcancen un peso molecular suficiente para que se rompa en trozos más pequeños que puedan ser desechados por microorganismos (Ortíz, 2017).

Al respecto, la recolección es el primer y más fundamental paso en la industria del reciclaje, que para el caso del PET consiste en la transformación de este en otro material que pueda ser reutilizado, es decir, darle utilidad a un material que ha sido presupuesto como inservible o basura. En este caso, el reciclaje de PET es un proceso viable en tanto genera la aparición de otro producto con valor añadido y que contribuye a disminuir los residuos (Ortíz, 2017).

Ahora bien, se requiere concretar una forma efectiva y eficiente de recolectar la mayor cantidad de plástico consumida, siendo esta la iniciación para empezar una recolección. En cuanto a esto, existen algunos métodos efectivos que posibilitan la recolección en lugares específicos para que luego puedan transportarse a una bodega donde los desechos podrán ser procesados. A su vez, estos métodos se distinguen en función del lugar acoplado al equipo que procesa los desechos y los hábitos que tenga la población. Cabe resaltar que la utilización de material reciclado proporciona beneficios como la descontaminación de los afluentes de ríos, quebradas o lagos, disminución de la contaminación de las zonas verdes, y tal vez lo más importante, una cultural del reciclaje fundamental para los tiempos modernos (Ortíz, 2017).

7.5.3. Propiedades del PET

Respecto a otros materiales, los envases de polímeros pueden ser producidos a menor costo y su facilidad de producción, es, asimismo, mucho mayor que la de otros materiales. El plástico ha sustituido varios materiales que han posibilitado que la comida pueda ser preparada y comercializada instantáneamente (Ortíz, 2017).

Fue en 1977 cuando la aparición de los primeros envases PET causaron una revolución en la manera de procesar y envasar alimentos y otros productos, durando incluso hasta la actualidad. Por otro lado, estos envases son usados principalmente para contener líquidos a presión, siendo el envasado de bebidas carbonatadas su principal aplicación. Entretanto, el bajo costo de producción y la aparición de nuevas tecnologías que mejoran las características y propiedades de este material, han propiciado que el número de usos del PET haya incrementado notablemente durante los últimos años (Ortíz, 2017).

7.5.4. Preparación del PET para mezclas asfálticas

En primer orden, el polímero correcto para una aplicación debe escogerse teniendo en cuenta las características y propiedades del cemento asfáltico y su compatibilidad con el asfalto base. Para esto, se eligen por lo general elastómeros, componentes incluidos en la familia del tereftalato de polietileno (PET), para proporcionar una mayor resiliencia y flexibilidad al pavimento, además de producir una mezcla con altos niveles de estabilidad y

rigidez. Los resultados obtenidos de un proceso de modificación de asfalto dependen altamente de la concentración, peso molecular, composición química y orientación molecular del tereftalato de polietileno (PET), así como la fuente del crudo, del proceso de refinación y del grado del asfalto que se utiliza.

Según Ortiz (2017) cuando se añaden polímeros como el tereftalato de polietileno (PET) al asfalto, las propiedades de este cambian y pasan a depender de algunos parámetros como:

- Tipo de polímero a emplearse, ya sea elastómeros o plastómeros.
- Su forma física.
- Naturaleza y grado de asfalto.
- Tipo de equipo a utilizar.
- Tiempo y temperatura durante el mezclado.
- La compatibilidad de mezcla asfáltica-polímero.

7.6. Tipos y usos de los asfaltos

7.6.1. Asfaltos

Se denomina asfaltos a aquellas sustancias compuestas principalmente por hidrocarburos solubles en sulfuros de carbono y que pueden ser líquidas, sólidas o encontrarse en un estado semisólido. Por otra parte, los asfaltos pueden provenir de yacimientos naturales o bien del procesamiento de petróleos brutos ya sea por medio de extracción o refinamiento. Entre sus cualidades se destacan las propiedades fisicoquímicas y sus propiedades aglutinantes que lo hacen óptimo para cualquier tipo de aplicación siendo la más común el pavimento. Además, son usados por la versatilidad de los materiales bituminosos. Por último, los asfaltos naturales, los cementos asfálticos, los asfaltos líquidos o asfaltos rebajados son los principales tipos de ligantes bituminosos empleados para la construcción y el mantenimiento de estructuras con pavimentos flexibles (Reyes, 2003).

7.6.2. Clasificación y especificaciones

Asfaltos naturales

Son producto de procesos naturales que han formado asfaltos de varios tipos: algunos libres de materias extrañas casi por completo, y otros mezclados con cantidades variables de minerales como agua u otras sustancias. A su vez, los depósitos que se encuentran dentro de la estructura de una roca porosa se conocen por lo general con el nombre de rocas asfálticas, destacándose dentro de estas los manantiales, los lagos y las exudaciones (Reyes, 2003).

Asfalto derivado del petróleo

La refinación del petróleo es el origen de casi todo el asfalto que se usa hoy en día en el mundo, llamado en ocasiones asfalto residual para diferenciarlo del asfalto natural. Sin embargo, la industria del asfalto se ha visto obligada a referirse a este como “asfalto de destilación directa” debido a las implicaciones poco deseables que se le atribuyen por lo general al término residual. No obstante, vale la pena resaltar que este término es inexacto en tanto existen asfaltos producidos por destilación simple que no tienen ningún tratamiento posterior (Reyes, 2003).

Cementos asfálticos sólidos

Se trata de asfaltos refinados o bien de una combinación de asfaltos refinados con aceites fluidificantes que poseen una viscosidad apropiada para la pavimentación. Este tipo de asfaltos se designan por lo general con las letras AC. De igual modo, este tipo de asfaltos resultan apropiados para la pavimentación gracias a sus propiedades aglutinantes e impermeabilizantes y su flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la acción de ácidos, sales o alcoholes (Reyes, 2003).

Asfaltos líquidos

Pueden ser denominados también como asfaltos rebajados o *cut backs*, y se caracterizan por ser material asfáltico con una consistencia blanda o fluida que ocasiona que salga del campo en que se aplica el ensayo de penetración, cuyo límite máximo es de 300. Además, están compuestos por una base de cemento asfáltico y bencina, queroseno, o aceite (Reyes, 2003).

Emulsiones asfálticas.

Se definen como un sistema heterogéneo de dos fases que por lo general son inmiscibles (asfalto al 60 o 70 % y agua). A este sistema se le agrega además una cantidad pequeña de un agente activador de superficies ya sea un tensoactivo o un emulsificante básico o ácido que mantiene al sistema en dispersión (Reyes, 2003).

La fase continua es el agua y la discontinua la componen los glóbulos de asfalto con un tamaño de entre uno y diez micrones. Así, cuando se produce un desequilibrio eléctrico que la rompe llevando a las partículas de asfalto a unirse a la superficie de agregado, el agua fluye o se evapora, separándose de las partículas pétreas recubiertas por el asfalto. Existen emulsionantes que permiten que esta rotura sea instantánea mientras que otras retardan este fenómeno. Finalmente, las emulsiones asfálticas pueden clasificarse en emulsiones de rompimiento rápido (RS), emulsiones de rompimiento medio (MS), y finalmente, las emulsiones de rompimiento lento (SS) (Reyes, 2003).

7.6.3. Usos y funciones del asfalto

Crudos del petróleo

Son ligantes bituminosos que, debido a sus propiedades ligantes, alto contenido de asfalto residual y grado de volatilización de los solventes que lo componen, se emplean por lo regular en su forma natural (Reyes, 2003).

Funciones del asfalto en la construcción de pavimentos

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir grandes esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. En la construcción de pavimentos puede cumplir las siguientes funciones como aplicación de estas propiedades:

- Impermeabilizar la estructura del pavimento haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación (Reyes, 2003).
- Proporcionar una íntima unión y cohesión entre agregados capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. Igualmente, mejora la capacidad portante de la estructura y, por ende, permite disminuir el espesor (Reyes, 2003).

Ningún otro material garantiza en mayor grado la satisfacción simultánea y económica de estas dos funciones, al tiempo que proporciona una estructura de pavimento con características flexibles (Reyes, 2003).

7.6.4. Composición química del asfalto

Con el fin de tener un control efectivo sobre las propiedades fisicoquímicas de los asfaltos y adecuar este a las funciones que desarrollará en la carretera, resulta de gran importancia conocer ampliamente la constitución y la composición química de sus componentes. Para empezar, tanto el asfalto como el petróleo se componen de numerosos hidrocarburos mezclados en proporciones diferentes (los hidrocarburos son átomos de carbono unidos entre sí por enlaces sencillos, dobles o triples y cuyas valencias libres se saturan con átomos de hidrógeno) (Reyes, 2003).

La mayor parte de los hidrocarburos livianos se eliminan durante el proceso de refinación y solo quedan los hidrocarburos más pesados, que son moléculas complejas (Reyes, 2003).

7.6.5. Características reológicas del asfalto

Referida a la variación de las propiedades del flujo en el tiempo debido a la aplicación de una carga, la reología constituye una de las propiedades más importantes de todo tipo

de productos asfálticos. Por lo demás, incluye otra propiedad igualmente importante: la viscosidad, que varía de acuerdo con la temperatura en mayor o menor grado (susceptibilidad térmica) y cuyo estudio es del mayor interés en tanto esta propiedad debe modificarse siempre mediante el calentamiento (Reyes, 2003).

Por ejemplo, a alta temperaturas el asfalto es considerado un fluido viscoso, mientras que en temperaturas bajas es un material sólido con propiedades elásticas. Actualmente, se utilizan monogramas y curvas que relacionan las propiedades esenciales del asfalto (Reyes, 2003).

7.6.6. Asfaltos modificados

Se presentan casos en los que las características de las mezclas asfálticas obtenidas con los cementos asfálticos convencionales no son capaces de resistir la acción conjunta del tránsito y del clima, por lo que resulta necesaria la utilización de ligantes modificados que presenten mejores propiedades reológicas, un mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica (Reyes, 2003).

Las mezclas asfálticas elaboradas con estos ligantes modificados presentan altos valores de rigidez a temperaturas altas de servicio, lo que disminuye el ahuellamiento, y bajos valores de rigidez a temperaturas bajas, que reducen el riesgo de aparición prematura de fisuras. De igual manera, el grado de afinidad ligante-agregado en presencia de agua se mejora sustancialmente (Reyes, 2003).

El empleo de ligantes más duros puede servir para mejorar algunas de estas propiedades, sin embargo, esto significará que la flexibilidad a temperatura ambiente se reduzca y que el ligante tenga mayor fragilidad a bajas temperaturas (Reyes, 2003).

Reyes (2003) menciona que con el fin de mejorar las propiedades del asfalto sin generar efectos negativos colaterales, actualmente se están usando en todo el mundo asfaltos modificados con polímeros. Así, con el uso de modificadores y aditivos se puede obtener:

- Mejoramiento de la rigidez del cemento asfáltico a temperaturas altas de servicio, minimizando el riesgo de ahuellamiento.
- Mezclas más flexibles a temperaturas bajas de servicio para minimizar la aparición de fisuras asociadas a los cambios térmicos.
- Mejoramiento de la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas.
- Mejoramiento de la afinidad ligante-agregado pétreo, con el fin de reducir el riesgo de stripping o pérdida de adherencia.
- Mejoramiento de la resistencia a la abrasión de las mezclas asfálticas.
- Rejuvenecimiento del cemento asfáltico.
- Reducción de los problemas durante el proceso de colocación y compactación de la mezcla asfáltica.

- Mejoramiento de las características elásticas del cemento asfáltico.
- Mayor espesor de película de ligante alrededor de las partículas del agregado, con el propósito de aumentar la durabilidad de la mezcla.
- Reducción de la probabilidad de exudación del cemento asfáltico.
- Disminución de los espesores de la estructura del pavimento.
- Mejoramiento del comportamiento general de toda la estructura del pavimento.

Finalmente, una mezcla asfáltica ideal debe poseer las siguientes características esenciales expuestas en la Figura 13:

- Baja rigidez o viscosidad a las temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra (Reyes, 2003).
- Alta rigidez a las temperaturas altas de servicio para reducir el ahuellamiento (Reyes, 2003).
- Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperatura (Reyes, 2003).
- Buenas características adherentes en presencia de humedad, con el propósito de reducir el *stripping* (Reyes, 2003).

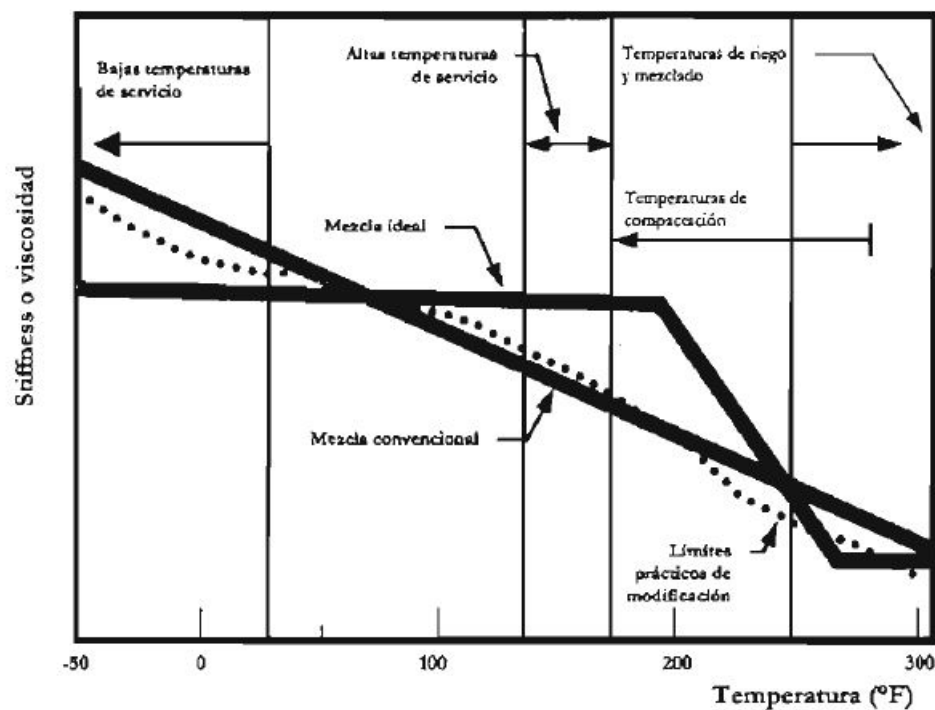


Figura 13: Características deseadas de una mezcla asfáltica (Reyes, 2003)

Anteriormente, ciertas propiedades se podían conseguir con los cementos asfálticos comunes. En la actualidad, con el aumento del volumen de tránsito y de la presión de inflado, el incremento en las sobrecargas de los autos pesados y el hallazgo de crudos nuevos es primordial modificadores y aditivos para tener mezclas que sigan con la mayor cantidad de estas exigencias (Reyes, 2003).

El asfalto es el encargado del comportamiento viscoelástico de todos los componentes bituminosos, sus características establecen muchos factores del proceder de las mezclas en las vías (Reyes, 2003).

Tipos de polímeros

Luego de que los polímeros se esparcen en el asfalto, estos conforman tejidos tridimensionales, al instaurar un reticulado que le brinda atributos esenciales de elasticidad al asfalto que se transformó (Reyes, 2003).

Se evidencian muchas clases de polímeros, por ello su dosificación y sistematización son muy intrincadas. Estos se dividen en:

- **Polímeros termoplásticos.** Estos son solubles, también se reblandecen con el calor y según su intensidad pueden comenzar a fluir. Después de que se enfrían, se pueden moldear varias veces sin que se disipen sus atributos. Generalmente, son lineales o levemente ramificados. Los termoplásticos más conocidos son el polietileno, el polipropileno, el policloruro de vinilo, el poliestireno, los copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA) y las poliamidas, etc (Reyes, 2003).
- **Polímeros termoendurecibles.** Se constituyen por la reacción química de dos elementos: la base y el endurecedor, estos forman una configuración entrecruzada y no pueden retomar para volver a modificarse. Algunos de ellos son las resinas fenólicas, las epoxi, las de poliéster y las de poliuretano (Reyes, 2003).
- **Elastómeros o cauchos.** Estos son lineales amorfos e insaturados. Al llevarlos a un procedimiento de vulcanización, alcanzan una conformación parcialmente reticulada, esta les brinda las propiedades elásticas. Los cauchos que más se emplean son el natural, los de butadieno-estireno (SBR), los de policloropreno y los elastómeros termoplásticos de estireno-butadieno-estireno (SBS) (Reyes, 2003).

Los polímeros que más se usan para transformar los cementos asfálticos son el caucho natural (NR), los copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA) y los elastómeros termoplásticos de estireno-butadieno-estireno (Reyes, 2003).

Los elementos poliméricos, su composición química, configuración (lineal, ramificada, entrecruzada), estructura espacial, estado de agregación, peso molecular, aditivos, entre otros tienen una gran cantidad de características que no facilitan su sistematización. No obstante, estos poseen una sucesión de atributos comunes:

- **Propiedades mecánicas.** La conducta mecánica de los polímeros a temperatura normal puede cambiar desde la particularidad de un vidrio duro y frágil hasta la

elasticidad y maleabilidad de una goma. Estas se miden comúnmente con pruebas de tracción, compresión, flexión, dureza, impacto, desgarro, etc. La gran mayoría de los polímeros presentan un comportamiento neológico de grado viscoelástico, esto genera que sus aspectos mecánicos se sometan en gran magnitud del tiempo que dure la carga. Si se atribuye un esfuerzo continuo, existirá una deformación instantánea al inicio y una de fluencia (más paulatina). Si se conserva la modificación continua, el esmero esencial para generarla se reducirá gradualmente (relajación de esfuerzos) (Reyes, 2003).

- **Influencia de la temperatura.** Las alteraciones de esta producen modificaciones en los atributos de los polímeros, lo cual reduce su empleo a un cierto nivel. El alza de la temperatura genera un declive veloz de la resistencia mecánica en los elementos termoplásticos, estos empiezan antes de su marca de ablandamiento, las temperaturas inferiores los hacen más quebradizos y endebles, con la reducción de la resistencia a la tracción y al impacto. En los polímeros termoestables las características mecánicas se conservan en un nivel de temperatura mayor. Cuando baja la temperatura en los elastómeros, primero se genera un incremento de la dureza y al final, abajo de la temperatura de transición vítrea reducen su destreza de deformación y se vuelven débiles. Se aviejan a temperaturas altas y cuando hay oxígeno, con la carencia de particularidades (Reyes, 2003).
- **Durabilidad.** Se precisa como la competencia que posee todo elementos para conservar sus propiedades primarias en el tiempo. Las modificaciones de las características de los polímeros se originan por fatiga (atribución reiterada de esfuerzos) o por envejecimiento (acto del entorno), a pesar de esto, comúnmente, los dos aspectos actúan juntos. Los mediadores que pueden ofrecer transformaciones palpables en las particularidades de los polímeros son los agentes atmosféricos (agua, ozono, oxígeno y humedad), la radiación solar y el calor, los microorganismos, los agentes químicos y el tránsito. Las alteraciones que se producen por estos dependen de la clase de polímero, su composición y estructura química (Reyes, 2003).

Mecanismo de la modificación

Un ligante modificado se conforma de dos fases diversas y se tienen en cuenta tres casos:

- **Bajo contenido de polímero (inferior al 4 %).** En este hecho, el bitumen hace parte de la etapa constante en la que se extiende la fase del polímero. A temperaturas de servicio elevadas (60 °C), el módulo del polímero es perceptiblemente mayor al de la matriz que constituye la fase del bitumen, lo cual le brinda a esta la capacidad de fortalecer, al optimizar la conducta mecánica. A temperaturas reducidas el modelo de ciclo disgregado es más bajo que el de la matriz, por ello, se aminora considerablemente la debilidad. Así pues, la fase del polímero esparce y favorece las singularidades a temperaturas de servicio elevadas o bajas. La escogencia del asfalto es decisiva (Reyes, 2003).
- **Contenido de polímero del 5 %.** Aproximadamente: se consiguen microestructuras en las cuales las dos etapas son sucesivas. Estos patrones son complejos de vigilar y poseen problemáticas de estabilidad (su micromorfología y sus características están supeditados con frecuencia de sus estados térmicos próximos) (Reyes, 2003).

- **Contenido de polímero elevado (superior al 7%).** Existe una norma general, si el bitumen y el asfalto se eligen de forma favorable, el porcentaje de polímero es idóneamente alto, dado que la etapa del polímero conforma la matriz del modelo. En este caso particular, no se dispone de un bitumen, sino un polímero plastificado por sus aceites, en los que se hallan disipados los pedazos más macizos del ligante base. Los atributos de este sistema son dispares de las de un bitumen y están supeditados por los de los polímeros (Reyes, 2003).

El procedimiento de microscopia óptica de fluorescencia por reflexión facilita la visualización de las microestructuras a un aspecto de proporción mayor que está comúnmente alrededor de 250. En esas posiciones de observación el ciclo del polímero surge en blanco y la del bitumen se identifica en negro. En las Figuras 14, 15, 16 se pueden determinar tres clases de microestructuras (Reyes, 2003).

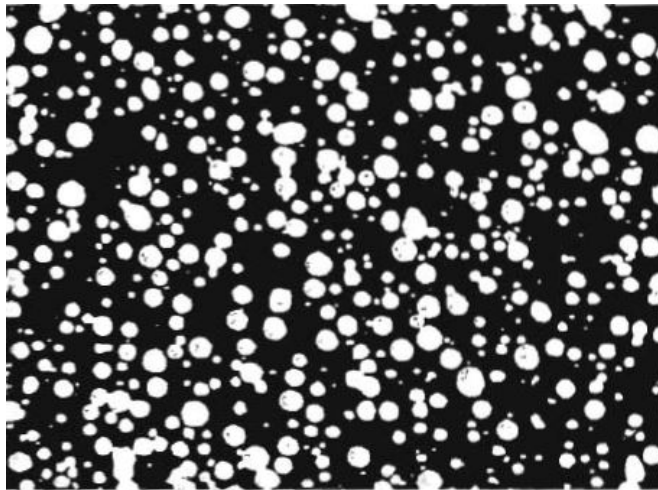


Figura 14: Ligante modificado con matriz de bitumen - microestructura - contenido de polímero inferior al 4% (Reyes, 2003)



Figura 15: Ligante modificado con dos fases - microestructura - contenido de polímero del 5% (Reyes, 2003)

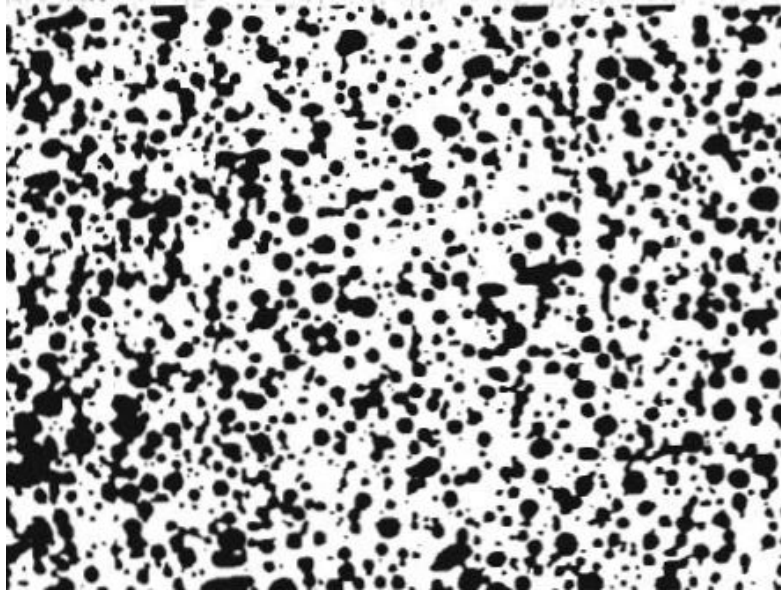


Figura 16: Ligante modificado con matriz de polímero - microestructura - contenido de polímero superior al 7% (Reyes, 2003)

Especificaciones de los cementos asfálticos modificados con polímero

Reyes (2003) señala que en los últimos años, se evidencia un interés gradual en la tecnología del asfalto por el uso de los ligantes modificados con polímeros. Esto está vinculado a los siguientes aspectos:

- El aumento de la venta de las mezclas asfálticas en caliente.
- El incremento en el volumen del tránsito, las altas cargas y las presiones de inflado ha generado ahuellamientos anticipados en el asfalto.
- La puesta en marcha de las particularidades que provienen del grupo de estudio SHRP, el cual solicita que el ligante asfáltico que se emplea en la producción de las mezclas asfálticas en caliente presente un comportamiento bueno a bajas y altas temperaturas de servicio. Muchos de los cementos asfálticos no tienen en cuenta esta petición, por eso, se pide un cambio.
- La aplicación del sistema de concesión de carreteras requiere extender la duración de la estructura del pavimento, al reducir las contingencias de la aparición de deficiencias adelantadas.

La mayoría de las singularidades primarias para estos elementos nuevos se ajustaron directamente desde las recomendaciones de los productores. Estas comprenden alguna clase de prueba que facilita la identificación de la concurrencia del polímero, pero no estima obligatoriamente la conducta que tendrá el nuevo ligante modificado (Reyes, 2003).

7.6.7. Durabilidad de los asfaltos

La durabilidad de un cemento asfáltico se precisa como su competencia para conservar las características ligantes y cohesivas en la mezcla, previo y luego del envejecimiento. Sus particularidades deben sostenerse a lo largo de la vida favorable del pavimento. Por tanto, en esa inmutabilidad la naturaleza del material lleva a cabo un rol elemental, el cual está conformado por hidrocarburos de diversos grados de polaridad y, en contraposición, esta evolución tiene una función central de elementos internos y externos. Los aspectos internos y el sistema coloidal propio evidencia una inclinación a transformarse hacia la gelificación, con ese incremento de la dureza y fragilidad. Los estados climáticos, la potencia del tránsito, los atributos particulares de la mezcla planteada y el procedimiento constructivo son rasgos externos que reducen la durabilidad del ligante asfáltico y afectan en la conducta de la estructura del pavimento (Reyes, 2003).

La durabilidad de una mezcla asfáltica hace alusión a la idoneidad que tiene para soportar la acción del tránsito y clima sin contar con fisuras, la alteración o desintegración durante el tiempo útil de la estructura del pavimento, la cual está enlazada a las cualidades fisicoquímicas del ligante, estas normalizan un comportamiento reológico de las particularidades de la mezcla (Reyes, 2003).

La singularidad del cemento asfáltico es un aspecto sustancial en la durabilidad de las capas de rodadura asfálticas, si los planes de la constitución del pavimento y de la mezcla se han efectuado de modo adecuado y se ha llevado a cabo un monitoreo de calidad sobre el procedimiento constructivo. Hay seis componentes que aportan al envejecimiento de un cemento asfáltico en el trascurso de colocación o servicio:

- **Oxidación:** es la reacción del oxígeno del aire con los elementos químicos del cemento asfáltico. La velocidad y la magnitud de la oxidación están supeditadas por los elementos del cemento asfáltico, su mezcla y de la temperatura del aire (Reyes, 2003).
- **Volatilización:** es la dispersión de los solventes más ligeros. Primeramente, es labor de la temperatura. No es un aspecto que coadyuve al envejecimiento en un lapso largo del asfalto en condiciones de servicio (Reyes, 2003).
- **Polimerización:** es una conjunción de moléculas contiguas para integrar nexos débiles carbono-carbono en cadenas lineales enormes, al ocasionar un endurecimiento gradual del cemento asfáltico.
- **Tixotropía:** es el endurecimiento sucesivo por la constitución de una estructura dentro del asfalto durante un tiempo particular, esta puede eliminarse por recalentamiento o en el servicio de la mezcla asfáltica. La tixotropía que está vinculada a pavimentos que tienen escaso o ningún tránsito, es tarea de la composición química del cemento asfáltico (Reyes, 2003).
- **Sinéresis:** es una reacción de oxidación, por medio de esta los aceites menos pegajosos circulan hacia la superficie de la película del ligante, por ello, el cemento asfáltico se endurece de forma rápida (Reyes, 2003).
- **Separación:** es el removimiento de elementos que constituyen el cemento asfáltico así

como los aceites, resinas y asfáltenos, esto es provocado por una absorción selectiva de agregados de alta porosidad (Reyes, 2003).

Mientras existan enormes cantidades de cemento asfáltico a una temperatura superior en los tanques de almacenamiento, no se evidencian transformaciones sensibles en sus características. Empero, cuando se revuelve el asfalto caliente con los añadidos que también están calientes, esparciéndolos en películas delgadas sobre su superficie durante el procedimiento de mezclado, el estado es muy favorable a la falta de las fracciones más ligeras a la oxidación y a la adsorción-absorción de algunos aspectos de los añadidos. En el procedimiento de mezclado se exhibe el asfalto al aire y a las temperaturas superiores durante un corto tiempo, donde se evidencia cambios axiales en su comportamiento reológico y se reduce la penetración, se incrementa su viscosidad y ablandamiento por la oxidación que produce el aire y la carencia de los solventes más volátiles. La vigilancia de las temperaturas del asfalto y de los áridos, y la disminución al mínimo del tiempo de mezclado, amina en gran medida el peligro de un posible endurecimiento nocivo (Reyes, 2003).

De igual forma, el avance de envejecimiento del cemento asfáltico en el pavimento ocurre en un lapso largo. Algunos aspectos que lo generan son el endurecimiento y debilidad con el paso del tiempo, la oxidación atmosférica de algunas moléculas del asfalto, debido a la constitución de conjuntos funcionales que engloban oxígeno, altamente polares y de interacción química consistente. En consecuencia, los ligantes tienen un más o menos envejecimiento. Estos cambios alteran sus atributos de flujo y su consistencia; el cemento asfáltico va reduciendo su poder ligante, se vuelve débil y endeble, lo cual facilita que el agua entre por medio de la película y movilice el asfalto, al malograr la mezcla (Reyes, 2003).

En servicio el envejecimiento del cemento asfáltico está relacionado con el tiempo, la temperatura, la absorción del agregado, el contenido de ligante asfáltico, el espesor de película que está a los lados de las partículas y las singularidades del ligante asfáltico (Reyes, 2003).

7.6.8. Propiedades reológicas y comportamiento en servicio

La reología es el campo de la mecánica que estudia la conducta de la materia a lo largo del tiempo de aplicación de la carga, esto se efectúa por medio del análisis de características de flujo y deformación: viscosidad, ductilidad y fragilidad, al determinar una vinculación entre la condición coloidal de los cementos asfálticos y su composición química. Cuando un material es doblegado a un esfuerzo cortante idóneo y enorme este es capaz de deformarse o fluir. La mecánica racional cree que los cuerpos son componentes indeformables y la mecánica elástica los entiende como sólidos excelentemente elásticos. Según la ley de Hooke, la reología trata el caso más común en el cual las deformaciones que genera un intermediario exterior o por un procedimiento inherente donde surgen ligadas de manera íntima al tiempo. La disposición coloidal de los ligantes asfálticos complica la indagación de sus aspectos reológicas, esto se enreda más por su índole termoplástica pronunciada, esto es, su capacidad de ablandarse y deformarse, a causa del calor y de recobrar sus atributos primigenios al enfriarse. Esto ha permitido que se use el cemento asfáltico como ligante desde la antigüedad, pero también ha complicado el análisis de sus propiedades reológicas, dado que todas deben examinarse en función de la temperatura, que se reproducen por curvas más o menos complejas (Reyes,

2003).

A aquellos fluidos en los que hay una correspondencia entre la tensión cortante y la velocidad de deformación se les llama newtonianos o de flujo simple (ver Figura 17). Esta clase de flujo se entiende como viscoso o lineal y la gráfica que se presenta más adelante se nombra como curva de flujo o de consistencia. En los elementos newtonianos, la viscosidad (η) determina por completo el flujo, puesto que es autónoma de la fuerza que se aplica y de la velocidad de deformación. Un aspecto particular de los cementos asfálticos de flujo newtoniano es esta: cuando la tensión cortante se multiplica por un componente A, a la velocidad de deformación cortante le ocurre lo mismo con este (Reyes, 2003).

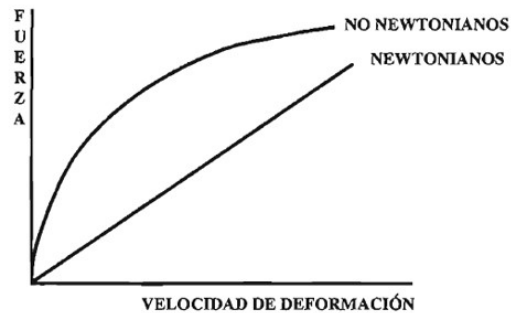


Figura 17: Cemento asfáltico - curva de flujo (Reyes, 2003)

Curvas de flujo de los cementos asfálticos

En el diagrama velocidad de flujo-fuerza de corte únicamente se señala si el componente es newtoniano o no. Por eso, es central efectuar otras precisiones que complementen los datos anteriores para poder identificar con exactitud la categoría de flujo no newtoniano. Una de estas es elaborar las curvas de desplazamiento vs. tiempo y velocidad vs. tiempo, al mantener constante la fuerza que se aplica. En la Figura 18 se exponen las curvas velocidad vs. tiempo para diversos tipos de cemento asfáltico (Reyes, 2003).

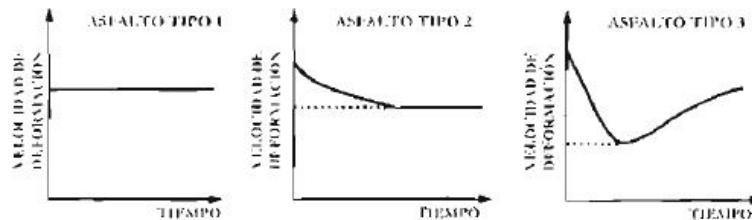


Figura 18: Cambio de velocidad en la deformación para distintos tipos de cemento asfáltico (Reyes, 2003)

- **Cemento asfáltico tipo 1:** la velocidad de deformación es permanente y proporcional a la fuerza (o tensión cortante) que se emplea. Estos son los llamados cementos asfálticos newtonianos (Reyes, 2003).

- **Cemento asfáltico tipo 2:** la velocidad de modificación reduce en un inicio, luego de la aplicación de la carga, hasta volverse constante de forma sensible en un valor proporcional a la carga que se utilizó. Aquellos son particulares de los cementos asfálticos viscoelásticos (Reyes, 2003).
- **Cemento asfáltico tipo 3:** la velocidad de deformación decrece en un primer momento, al pasar por un mínimo. Esto depende de la fuerza aplicada, la cual puede aumentarse de manera indeterminada o interrumpirse en caso de equilibrio. Aquí están los cementos asfálticos tixotrópicos (Reyes, 2003).

Influencia de la temperatura en la viscosidad

El análisis cuantitativo del influjo de la temperatura en la viscosidad del cemento asfáltico conlleva un interés práctico elevado. En la mayoría de las aplicaciones del cemento asfáltico se debe transformar su viscosidad por calentamiento en algún tiempo, por ello, es pertinente contar con las curvas viscosidad o temperatura de los ligantes, las cuales se consiguen de forma empírica, para establecer la viscosidad del producto a una secuencia de temperaturas (Figura 19) (Reyes, 2003).

El cemento asfáltico se constituye de micelas, en su centro la concentración de asfaltenos es muy alta, y se transfiere a las resinas y a los aceites o líquido intermicelar por un procedimiento paulatino de dilución. Al aumentarse la temperatura, las fuerzas de adsorción que ligan las moléculas se reducen, lo cual se explica en un incremento de la acción de los disolventes, esto hace que, en un cemento asfáltico caliente, el líquido intermicelar se apropie de un volumen enorme en el cemento asfáltico frío, inclusive, la viscosidad del líquido intermicelar se mitiga. Por ende, se identifican micelas de menor volumen esparcidas en un líquido intermicelar de viscosidad menor. También, los vínculos entre micelas que pudieron determinarse en un comienzo se habrán esfumado o menguado, de forma que la viscosidad del cemento asfáltico decrece con el calentamiento (Reyes, 2003).

Si el incremento de la temperatura es bastante, se genera una transformación de tipo reológico, a saber, un cemento asfáltico que a una temperatura particular hace parte del al tipo 2 a una temperatura más alta puede comportarse como un cemento asfáltico tipo 1 a la temperatura originario. Así pues, conocer sobre la susceptibilidad térmica de un cemento asfáltico es esencial para especificar las temperaturas perfectas de manejo (Reyes, 2003).

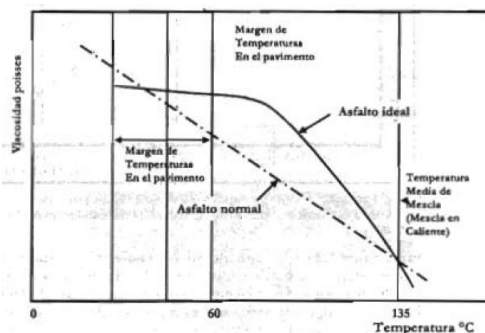


Figura 19: Relación viscosidad-temperatura de un cemento asfáltico (Reyes, 2003)

Susceptibilidad térmica del cemento asfáltico

Este es un material termoplástico, cuya constitución se altera con la temperatura, la magnitud y el lapso de la carga. Su susceptibilidad térmica se puntualiza como la transformación de la consistencia, medida comúnmente por la viscosidad, con una modificación de la temperatura. De igual forma, es una característica intrínseca a todo cemento asfáltico, el cual se debe manipular y aprovechar enormemente. Se necesitan dos medidas de la viscosidad como mínimo, para así ser posible determinar la susceptibilidad térmica de un asfalto. Los cementos asfálticos con un grado superior de susceptibilidad térmica no son atractivos, dado que su viscosidad a 135C, la cual está muy baja, puede generar problemas en el procedimiento de colocación y compactación. Por otro parte, a bajas temperaturas de servicio su viscosidad puede ser más alta y ocasionar inconvenientes de fisuramiento, debido a contracciones térmicas (ver Figura 20) (Reyes, 2003).

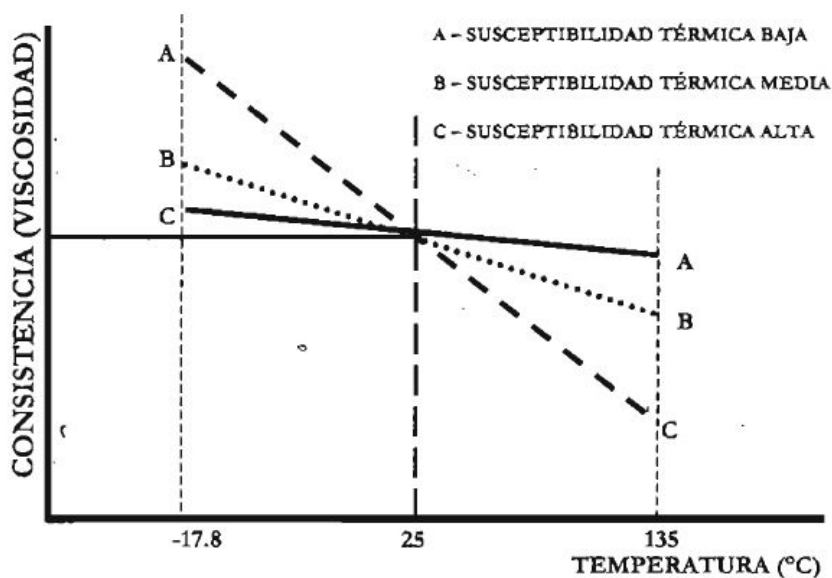


Figura 20: Cementos asfálticos - Curva de susceptibilidad térmica (Reyes, 2003)

En la Figura 20 el asfalto C posee la pendiente más firme de los tres, su consistencia se altera más rápidamente dentro de un grado de temperaturas, por ello, se menciona que este tiene una susceptibilidad térmica superior. Regularmente, se restaurarán pavimentos muy duros, estos tendrán fisuramientos a temperaturas bajas mucho más altas que las de suelos que cuentan con dos asfaltos (Reyes, 2003).

Si un cemento asfáltico presenta una viscosidad demasiado baja a las altas temperaturas de servicio, se producirán ahuellamientos. Si en contraposición este contiene altas viscosidades a bajas temperaturas de servicio, aparecerán fisuramientos. Esto va anudado a las alteraciones en el sistema coloidal que pudieron evidenciarse en la construcción de la mezcla en planta (Reyes, 2003).

Reyes (2003) considera que la susceptibilidad térmica de un cemento asfáltico se emplea primordialmente en estas ocasiones:

- Precisión de las temperaturas de colocación y compactación.
- Calibración de las temperaturas de manejo en planta y en servicio.

7.6.9. Emulsión de asfalto modificado con polímero

Estas se reconocen por su naturaleza iónica: aniónica o catiónica, lo cual depende de la carga de los fragmentos, negativos o positivos, a causa de su estabilidad en asociación con los componentes granulares: ruptura rápida, semirápida, lenta o emulsiones sobrestabilizadas y por el material en peso del ligante de base (Reyes, 2003).

Cuadro 6: Emulsiones asfálticas modificadas con polímeros y sus aplicaciones

Tipo de emulsión	Aplicación
Rotura rápida CRR-1 m y CRR-2 m	Tratamientos superficiales con agregados Riegos de liga
Rotura media CRM	Mezclas abiertas en frío
Rotura lenta CRL-1 hm	Microaglomerados en frío

(Reyes, 2003)

Las pruebas sobre las emulsiones modificadas son iguales que en las normales. Estas solo son diferentes en las pruebas sobre el residuo, pues no se consigue por destilación, sino por evaporación, dado que algunos polímeros pueden deteriorarse en la destilación. Aquellos que diferencian son:

- Se suprime el ensayo de solubilidad, puesto que algunos polímeros pueden no ser solubles con el disolvente que se empleó o no se solubilizan (Reyes, 2003).
- Se agrega la penetración, al conservar márgenes iguales que en emulsiones comunes (Reyes, 2003).
- Se incluye la prueba de punto de ablandamiento, para identificar la conducta del ligante a alta temperatura y verificar la alteración de este (Reyes, 2003).
- Se añade el ensayo de recuperación elástica, para evaluar la elasticidad del ligante (Reyes, 2003).

7.6.10. Especificaciones de utilización

Capas de rodadura en calzadas y capas de base asfálticas

Para estas se facilita el empleo de asfalto puro y de emulsiones asfálticas modificadas con polímeros. En el Cuadro 7 se señalan los tipos de asfaltos puros que pueden usarse, de acuerdo con el material (Reyes, 2003).

Cuadro 7: Material de mezcla según clase de asfalto

Tipo de capa	Clase de asfalto
Capas de rodadura en mezcla asfáltica (norma INV E-706)	60/70 u 80/100
Capas delgadas en mezcla asfáltica (norma INV E-706)	60/70 u 80/100
Capa de base GA (norma INV E-706)	40/50 o 60/70

(Reyes, 2003)

Capas de base en granulares - emulsión con asfalto puro

Las emulsiones que se emplean en las mezclas granulares-emulsión son frecuentemente catiónicas, las cuales tienen que ser de ruptura gradual. El material en ligante de base (en peso) debe estar entre 60 % y 65 %, y es necesario que sea asfalto puro 80/100 (Reyes, 2003).

Capas de rodadura en tratamientos superficiales

Las emulsiones aniónicas no se pueden usar dentro de las escalas ligantes asfálticas. Según el tráfico se tienen que utilizar al menos las clases que se exhiben en el Cuadro 8 (Reyes, 2003).

Cuadro 8: Tratamientos superficiales dependiendo de la categorías y tipos de ligantes

Categorías tránsito	Inferior a T2 < 50 VP ⁽¹⁾ /día	T2 50-150 VP/día	T3 150-300 VP/día	T4 300-750 VP/día	T5 750-2000 VP/día
Emulsiones catiónicas de ruptura rápida	CRR 65	CRR 65	CRR 69	-	-
Ligantes modificados	-	-	Seguir las recomendaciones del fabricante		

(1) Vehículos pesados.

(Reyes, 2003)

Controles

Con la supervisión de interventoría, el contratista tiene que efectuar los controles sobre los ligantes asfálticos. Por otro lado, el interventor debe ejecutar los monitores elementales para asegurar la calidad de los productos (Reyes, 2003).

En los controles para el abastecimiento es crucial tener presente una muestra de dos litros de asfalto por cada camión cisterna o 15 toneladas de producto si se llevan en carrotanques, a la salida del lugar, sobre estos deben existir como mínimo las pruebas que se mencionan en el Cuadro 9 (Reyes, 2003).

Cuadro 9: Ensayos que se deben de realizar a los ligantes asfálticos

Asfaltos puros	Emulsión
Penetración (norma INV E-708)	Identificación de contenido en agua (INV E-761)
Punto de ablandamiento (norma INV E-712)	Viscosidad (INV E-763)
Pérdida de masa por calentamiento (norma INV E-708)	Susceptibilidad (NFT 65-011)
Porcentaje de penetración residual (norma INV E-706)	Adhesividad (norma INV E-775)
Estabilidad en almacenamiento (norma INV E-770)	

(Reyes, 2003)

7.7. Mezclas asfálticas

7.7.1. Generalidades

Rondón y Reyes (2015) mencionan que las mezclas asfálticas son la unión de agregados pétreos y un ligante asfáltico. Se fabrican regularmente en plantas mezcladoras, aunque en ciertos casos pueden elaborarse en el lugar. A continuación, se presentan algunas mezclas asfálticas:

- Mezclas abiertas en frío.
- Mezclas abiertas en caliente.
- Mezclas densas en frío.
- Concreto asfáltico o mezcla densa en caliente.
- Arena — asfalto.
- Tratamientos superficiales.
- Lechadas.
- Mezclas asfálticas drenantes.

- Mezclas discontinuas o microaglomerados en caliente.
- Mezclas tibias.
- Mezclas asfálticas modificadas.
- Materiales granulares estabilizados con asfalto en frío o en caliente.

Las propiedades básicas que se buscan en las mezclas son estas:

- Resistencia bajo carga monotónica a tracción (estabilidad).
- Resistencia a las deformaciones permanentes.
- Resistencia a fatiga.
- Resistencia al deslizamiento.
- Impermeabilidad.
- Resistencia al envejecimiento.
- Durabilidad.
- Resistencia a las condiciones ambientales.
- Trabajabilidad.
- Economía.

Las distintas clases de mezclas asfálticas están constituidas por agregados pétreos con granulometría y condiciones pequeñas de calidad diversas. Por añadidura, se evidencian divergencias sobre su funcionamiento en la organización de pavimento y al material asfáltico o ligante que emplean (Rondón & Reyes, 2015).

7.7.2. Agregados pétreos

La conceptualización técnica de Agregados pétreos en pavimentos hace mención a una conjunción de fragmentos inmóviles de gravas, arenas, finos o *fillers* (naturales triturados) que se usan para la elaboración de mezclas asfálticas, concretos hidráulicos y elementos estabilizados o para la fabricación de capas de terraplén, afirmado, subbase y base granular (ver Figura 17). En palabras generales, en una prueba de granulometría por cribado o tamizado, los fragmentos con diámetro entre 2 mm y 6.4 cm se identifican como gravas. Las que tienen un diámetro entre 0.075 mm y 2 mm se conocen como arenas (gruesas y finas) y, finalmente, aquellas que presentan un diámetro inferior a 0.075 mm se determinan como arcilla, por su tamaño. La arcilla puede nombrarse así: filler o llenante mineral, si no prueban plasticidad cuando entran en contacto con el agua (índice de plasticidad, $IP=0$) (Rondón & Reyes, 2015).



Figura 21: Agregados pétreos provenientes de una planta de trituración

En una constitución de pavimento con capa asfáltica, los agregados pétreos más rigurosos, en relación a durabilidad, textura y resistencia mecánica son los que configuran las mezclas asfálticas. En estos últimos elementos los agregados pétreos son entre el 88 % y el 96 % de la masa y más del 75 % del volumen. En las mezclas asfálticas, estos son los que deben sobrellevar las cargas forzadas por el parque automotor y transferirlas en cantidades más pequeñas a las capas ocultas. Estos materiales dependen de esa calidad que, en gran parte de la transformación de los mecanismos de daño se producen en mezclas asfálticas como el ahuellamiento, la fatiga, el *stripping* y el deterioro por humedad. Los agregados pétreos deben tener una granulometría óptima y condiciones de calidad para constituir mezclas asfálticas. Así pues, para comprender más claramente la relevancia de los requisitos de calidad que se piden a los agregados pétreos, se efectúa una descripción concisa de las pruebas que se deben realizar sobre estos elementos (Rondón & Reyes, 2015).

- **Resistencia al desgaste en la máquina de Los Ángeles (AASHTO T 96, INV. E-218-13, 219-13).** Esta prueba se empleó en teoría para evaluar la resistencia a la abrasión o desgaste por fricción entre fragmentos. Pese a esto, el ensayo solo constituyó una resistencia al fracturamiento entre ellos por impacto, dado que, durante la prueba, agregados pétreos gruesos de hasta 37.5 mm (gravas) fueron afectados dentro de un cilindro metálico por esferas de acero de diámetro de 46.8 mm y una masa de entre 390 gr y 445 gr al fracturarlo (Rondón & Reyes, 2015).



Figura 22: Máquina de los ángeles
(UTEST, 2016)

- **Geometría de las partículas.** lo mejor en una mezcla asfáltica es que el agregado pétreo tenga una forma redonda con caras fracturadas. Los pedazos con esta constitución producen una estructura granular más condensado, menos deformable bajo carga y con más dureza entre contactos. Partículas alargadas y aplanadas producen estructuras granulares porosos (desfiguradas) y poca resistencia a fracturarse frente a una carga mecánica (Rondón & Reyes, 2015). Para medir la conformación de los fragmentos del agregado pétreo grueso dentro de la mezcla asfáltica, los ensayos axiales que se llevan a cabo son:
 - Caras fracturadas a una y dos caras (ASTM D 5821, INV. E-227-13). Prueba visual donde se evalúa el número o la masa de partículas de agregado pétreo grueso (9.5 y 90 mm de diámetro) que tienen caras fracturadas en una muestra relevante (Rondón & Reyes, 2015).
 - Índice de aplanamiento y alargamiento (NLT 354- 91, INV. E-230-13). Determina en porcentaje, la asociación entre las partículas alargadas y las aplanadas que posee una muestra de agregado pétreo grueso (6.3 y 63 mm de diámetro). Por tanto, una partícula aplanada tiene espesor inferior a $3/5$ del espesor común de la muestra y una alargada presenta una longitud máxima más elevada que $9/5$ de la magnitud media de la muestra. Para conocer si esta es alargada o aplanada, a los fragmentos del agregado se les ejecuta ciertas medidas dentro de unos calibradores metálicos estandarizados (Rondón & Reyes, 2015).
 - Partículas planas y alargadas (ASTM D 4791, INV. E-240-13). Con esta prueba se puntualiza el porcentaje de fragmentos alargadas y/o planas en una muestra crucial (Rondón & Reyes, 2015).



Figura 23: Calibrador proporcional para el índice de aplanamiento y alargamiento
(Contenco, 2019)

- **Equivalente de arena (AASHTO T 176, INV. E-133-13).** Este se usa para medir la cantidad de partículas de tamaño de arcilla que están unidas a una muestra de agregado pétreo fina (arena y limos). Su demasía de tamaño de arcilla en una mezcla asfáltica es indeseado puesto que este fragmento comienza a reemplazar aquellas gruesas del agregado pétreo. Del mismo modo, el gran número de finos genera carencia de adhesión con el asfalto y la relevancia de aumentar el material de este para acumularlo (Rondón & Reyes, 2015).



Figura 24: Equivalente de arena
(MATEST, 2018)

7.7.3. Concreto asfáltico

Estas mezclas son identificadas en Colombia de la siguiente manera: MDC (mezclas densas en caliente), MSC (mezclas semidensas en caliente), MGC (mezclas gruesas en caliente) y MAM (mezclas de alto módulo) (Rondón & Reyes, 2015).

Internacionalmente, son conocidas como mezclas HMA (Hot Mix Asphalt). El concreto asfáltico presenta agregados pétreos con granulometría bien gradada y con tamaños de partículas sólidas diferentes (gravas, arenas, finos, llenante mineral), mezcladas con cemento asfáltico. Estas mezclas deben fabricarse, extenderse y compactarse a alta temperatura (fabricarse entre 140 y 180 °C aproximadamente, dependiendo de la viscosidad del asfalto).

Se caracterizan por presentar un bajo contenido de vacíos con aire en volumen (entre 3% a 9% por lo general). Son mezclas de alta calidad, las cuales pueden ser utilizadas para conformar cualquier subcapa dentro de la capa asfáltica (rodadura, base intermedia y/o base asfáltica). El agregado pétreo utilizado para la elaboración de mezclas de concreto asfáltico debe satisfacer los requisitos de granulometría y calidad (Rondón & Reyes, 2015).

En el ámbito internacional, estas se reconocen como mezclas HMA (Hot Mix Asphalt). El concreto asfáltico tiene agregados pétreos con granulometría gradada y con proporción de fragmentos sólidos diversos (gravas, arenas, finos, llenante mineral) que se mezclan con cemento asfáltico. Estas se elaboran, esparcen y comprimen a temperatura superior (entre 140 y 180 ° C, lo cual depende de la viscosidad del asfalto). Se determinan por revelar un contenido bajo de vacíos con aire en volumen (3% a 9% frecuentemente). También son mezclas de calidad alta, estas se pueden emplear en la fabricación de alguna subcapa en la capa asfáltica (rodadura, base intermedia y base asfáltica). El agregado pétreo se usa para hacer mezclas de concreto asfáltico, las cuales deben cumplir los requerimientos de granulometría y calidad (Rondón & Reyes, 2015).

En los casos donde la fabricación de este material presenta un tamaño máximo de fragmento del agregado pétreo inferior a 1", es necesario efectuar un ensayo Marshall (AASHTO T 245, INV. E-748-13). En este se calcula la constitución volumétrica y la resistencia de la mezcla asfáltica, cuando está bajo la carga monotónica por medio del vínculo entre la estabilidad (E) y el flujo (F), con la finalidad de especificar el porcentaje adecuado de asfalto, el cual debe tener la mezcla para implementar en teoría su comportamiento más óptimo. E puede comprenderse como la carga monotónica máxima que está apta para soportar una briqueta de 1200 g de masa y medidas de 4" de diámetro y 2.5" de altura a temperaturas de servicio superiores (60 ° C) en el caso Marshall, en cuanto a F se habla del desplazamiento que vivencia en caso de error (si la prueba obtiene el valor de F). En el mundo, esta metodología de planeación ha sido sustituida por el método Superpave (Rondón & Reyes, 2015).

7.7.4. Mezclas asfálticas modificadas

En el mundo se evidencia dos maneras de empleo de polímero o aditivos para modificar los atributos de mezclas asfálticas. A estos procedimientos de modificación se les llaman vía húmeda y seca. En la primera, el polímero o aditivo se le añade al asfalto a temperatura superior y, después, el ligante ya transformado se le incorpora al agregado pétreo para constituir la mezcla asfáltica (por ejemplo, el desarrollo de elaboración con grano de caucho de llanta que se presenta en la Figura 25). En la segunda, el aditivo sustituye cierta porción del agregado pétreo (comúnmente las partículas más finas), este se integra a este a temperatura superior y más tarde, se admite el asfalto y se fabrica la mezcla asfáltica (Rondón & Reyes, 2015).



Figura 25: Proceso de producción de asfalto modificado con caucho (Rondón & Reyes, 2015)

La conducta más óptima de las mezclas asfálticas modificadas se consigue cuando el procedimiento de modificación se ejecuta por vía húmeda. Por otra parte, en el proceso en seco la conducta de las mezclas modificadas cambia entre admisible a devastador. La aptitud del aditivo para optimizar las particularidades de las mezclas asfálticas está subordinada a la clase de modificación (húmeda o seca) de la naturaleza, porcentaje y dimensión máxima de los fragmentos de aditivo, del tiempo y temperatura de esta entre el ligante y polímero (Rondón & Reyes, 2015).

7.8. Fallas en pavimentos flexibles

7.8.1. Tipo de fallas y su clasificación

El término falla se emplea para colapsos verdaderos del pavimento y desgastes simples. Los desgastes o fallas están vinculados al grado o señal de servicio, esto proviene de lo que cierta vez se creyó admisible (Barrera, 2014). Las fallas de los pavimentos se fragmentan de acuerdo con su naturaleza en tres grupos:

- **Falla estructural o por insuficiencia estructural:** esta genera una disminución de la capacidad de carga y se genera por una unión irregular de resistencia al cortante de cada una de las capas y sus espesores (Barrera, 2014).

Esta irregularidad se asocia con una estructuración del pavimento indebida. Aquellos que se fabrican con elementos de resistencia inadecuada, puede que ciertamente se use componentes de excelente calidad, aunque con espesores defectuosos de las capas del pavimento, lo cual produce la deficiencia estructural (Barrera, 2014).



Figura 26: Corrugación causada por la acción de tránsito combinada con una carpeta o base inestable (Gabela, 2013)

- **Falla por defectos constructivos:** los pavimentos pueden estar adecuados y conformados de forma correcta con elementos de calidad formidable, con propiedades mecánicas adecuadas, a pesar de que en el procedimiento de fabricación pueden ocurrir fallas que impactan en el rendimiento del pavimento, lo cual puede ocasionar errores de la estructura. Esta se vincula a la supervisión irregular, verificación de calidad de componentes y acciones a una disposición nefasta del contratista por economizarse inconvenientes, etc (Barrera, 2014).

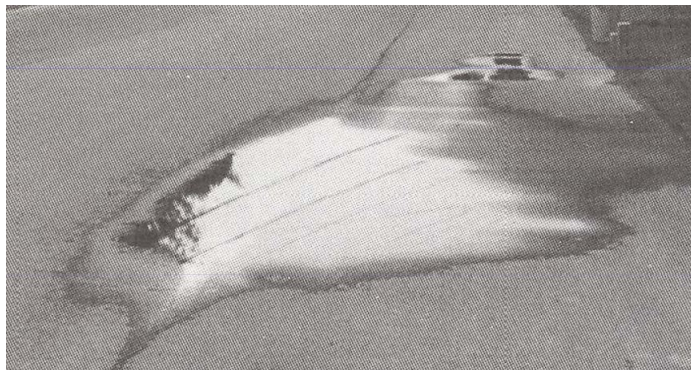


Figura 27: Depresión o asentamiento causado por una construcción incorrecta en las capas superiores del pavimento (Corredor, 2010)

- **Falla por fatiga:** a medida que pasa el tiempo y la repetición de cargas continua, los pavimentos que se construyeron de modo apropiado y bajo cada determinación pueden presentar irregularidades, debido a la fatiga de sus elementos que podrían tener degradación estructural, falta de resistencia y aglomeración de deformaciones (Barrera, 2014).



Figura 28: Piel de cocodrilo causada por las cargas repetidas de tránsito (Corredor, 2010)

Las fallas de diseño, constructivas o por fatiga pueden ocasionarse, a causa de fracturas, desintegraciones y deformaciones del suelo. Incluso, estas se dividen de acuerdo a su origen en cinco grupos, esto es, por la forma en que ocurren y se evidencian, estas son fallas por deformaciones, fisuras y grietas, desprendimientos, afloramientos y alisamientos (Barrera, 2014).

7.8.2. Fallas típicas por deformaciones

Se exponen las distintas clases de fallas que producen deformaciones:

Ahuellamientos

- **Huella de rodadura:** deformación longitudinal a causa del hundimiento en las rodadas de los vehículos. Estas pueden exponer cordones laterales en los lados de la huella y levantamientos (Barrera, 2014).



Figura 29: Huella de rodadura (Barrera, 2014)

- **Canalizaciones:** deformaciones longitudinales, debido a hundimiento en las huellas del tránsito, esto genera elevación de las zonas adyacentes, las cuales forman canales. Estas tienen un grado de severidad más grande que el ahuellamiento (Barrera, 2014).



Figura 30: Canalizaciones
(Barrera, 2014)

- **Asentamientos transversales:** estas son depresiones perpendiculares al eje del suelo, regularmente están ubicadas en juntas de pavimentos y donde pasa tubería subterránea (Barrera, 2014).



Figura 31: Asentamientos transversales
(Barrera, 2014)

Baches

Los baches son unos hundimientos en la parte superior del pavimento, en ciertas ocasiones se evidencian agrietamientos que parecen malla y, por lo general, tienen carencia de bloques de la carpeta de rodadura (Barrera, 2014).



Figura 32: Baches
(Barrera, 2014)

Corrugaciones

Las corrugaciones se identifican como ondulaciones en el suelo, casi siempre perpendiculares al eje de la vía. Las crestas y valles de las ondulaciones por lo regular se encuentran dispersas a distancias cortas, lo cual ocasiona la sensación de vibraciones (Barrera, 2014).



Figura 33: Corrugaciones
(Barrera, 2014)

Desplazamiento de borde

Los desplazamientos de borde hacen referencia a distorsiones, corrimientos, y grietas de la capa asfáltica en los extremos de la carretera (Barrera, 2014).



Figura 34: Desplazamiento de borde
(Barrera, 2014)

7.8.3. Causas posibles del origen de las fallas según su tipo

Razones de distintos orígenes impactan en el estado de la parte superior de rodamiento, esto incluye su función de brindar a las personas un rodaje certero, confortable y económico. En este apartado se puntualizan las causas probables que generan cada tipo de falla determinada (Barrera, 2014).

Fallas por deformaciones

En las siguientes secciones se especifican las razones que según Barrera (2014) producen las fallas de deformaciones en el pavimento .

Ahuellamientos

- Asentamientos longitudinales (huellas de rodadura y canalizaciones)
 - Cargas de un tránsito demasiado pesado en suelos de espesor inadecuado.
 - Calidad irregular y saturación del suelo en la subrasante.
 - Inestabilidad de las capas inferiores del pavimento.
 - Ligantes muy débiles en la mezcla asfáltica.

- Desmesura de ligante en la mezcla asfáltica.
 - Añadidos de agregado con canto rodado en la mezcla asfáltica.
 - Condición estructural del pavimento insuficiente.
 - Si la profundidad de las huellas es menor a 1 cm, el defecto fue causado por una deformación de la carpeta asfáltica, aunque si esta es mayor se debe a una compactación desastrosa y calidad defectuosa de la base.
- Asentamientos transversales
 - Imperfectos en la compactación de zanjas excavadas.
 - Deficiencias en la condensación de ingresos a obras de arte o unidades de drenaje subterráneo.
 - Cambio entre el corte-terraplén sin compactar.
 - Defectos de compactación de cierta capa del pavimento en una franja específica.
 - Saturación de la subrasante por errores en el sistema de drenaje.

Baches

- Gran cantidad de agua en la subrasante, a causa de un escape en el drenaje subterráneo.
- Humedad superior en puntos separados de las capas inferiores durante la condensación, lo cual evidencia su irregularidad al no alcanzar el 100% de densidad requerida.
- Calidad defectuosa de los componentes inferiores.
- Espesor inadecuado de la capa de asfalto.
- Errores que no se manejaron a tiempo, así como, la piel de cocodrilo.

Corrugaciones

- Por lo regular surgen en áreas de frenado y parqueaderos. Estos se identifican cuando hay un deslizamiento de las carpetas sobre la base, a causa de demasiado riego de liga.
- Estabilidad baja del recubrimiento asfáltico, esta ha sido reprimida por cargas pesadas.
- Si se habla de una mezcla en un lugar específico, es posible que se deba a la carencia de curado en la mezcla.
- Desequilibrio de las capas inferiores.
- Subbase frágil o gradada de forma irregular.
- Tráfico pesado y calor desmesurado.

Desplazamiento de borde

- Poca adherencia de la carpeta asfáltica.
- Carencia de contención en los taludes
- Tránsito pesado demasiado próximo al borde.
- Disminución en la estabilidad de la capa de rodadura.
- Desplazamiento de la base y subbase.
- Drenaje indebido (cunetas).
- Carencia de condensación y confinamiento en el extremo del pavimento.

7.9. Deterioro en pavimentos asfálticos

Hay varias clases de defectos que se generan en el pavimento asfáltico, los cuales tienen causas distintas, pues están sujetas a la carga que se le superpone, debido a la condensación inadecuada que se efectuó durante la fabricación de la carretera y la calidad de los componentes que se emplearon y la praxis inoportuna de procesos constructivos a ejecutar. Al brindarle el mantenimiento pertinente, se busca preservarla en perfecto estado, para que se ofrezca el servicio para el cual fue planteado de una forma efectiva (Hernández, 2015).

7.9.1. Fisuras y grietas

Esta clase de falla se evidencia en la carpeta asfáltica en las siguientes formas: transversales, longitudinales o en polígonos irregulares (Hernández, 2015).

Fisura piel de cocodrilo

Este tipo de error se identifica como una sucesión de grietas interconectadas, las cuales conforman polígonos pequeños como si fueran mallas. Este desgaste inicia en la sección inferior de la capa de concreto asfáltico o de la base, las tensiones y deformaciones que produjeron las cargas de tránsito vehicular al obtener sus valores más altos (Hernández, 2015).

Según Hernández (2015) esto lo generan algunas razones:

- Reiteración de cargas en el pavimento.
- Errores de drenaje.
- Espesor defectuoso.
- Deficiencia en la compactación

- Término de su vida útil.
- Envejecimiento del ligante.
- Carencia de flexibilidad.

Cuadro 10: Niveles de severidad fisura piel de cocodrilo

Nivel	Descripción
B (Bajo)	Fisuras muy finas, menores de 2 mm de ancho, paralelas con escasa interconexión, dando origen a polígonos de cierta longitud; los bordes de las fisuras no presentan desportillamiento.
M (Mediano)	Fisuras muy finas, menores de 5 mm, interconectadas formando polígonos pequeños y angulosos, que pueden presentar un moderado desportillamiento en correspondencia con las intersecciones.
A (Alto)	La red de fisuras ha progresado y constituye una malla cerrada de pequeños polígonos bien definidos, con desportillamiento de severidad moderada a alta, a lo largo de sus bordes; algunas de estas piezas pueden tener movimientos al ser sometidos al tránsito o pueden haber sido removidas por el mismo formando baches.

(Hernández, 2015)



Figura 35: Fisura piel de cocodrilo
(Hernández, 2015)

Fisura en bloque

Estas se encuentran interconectadas al constituir polígonos grandes, más o menos rectilíneos, esta clase de error se genera usualmente en una zona amplia del pavimento, resultado de la contracción del concreto asfáltico y las variaciones de temperatura que experimenta día a día, este no está vinculado a las cargas vehiculares y se da por el asfalto que se compacto de modo relevante (Hernández, 2015).

Hernández (2015) señala que este tipo de hendiduras se deben a varias causas:

- Contracción de las mezclas asfálticas.
- Alteraciones de extremos de temperatura.
- Fatiga de la estructura, debido a la degradación y falta de resistencia por hechos que se no tuvieron en cuenta en la planeación.
- Defecto en el drenaje.
- Fatiga de las cubiertas de la base hidráulica, la cual es generada por espesores incorrectos de cada uno de los componentes de la carretera.
- Capa de rodadura con agregado fino y contenido alto de asfalto de baja penetración (granulometría de planeación insuficiente).

Habitualmente es complejo corroborar si las hendiduras y grietas se deben a contracciones que generan en la capa de rodadura o en la base y subbase, la carencia de tráfico apresura la constitución de estas fisuras de contracción (Hernández, 2015).

Con frecuencia, el surgimiento de estas grietas no está relacionado a las cargas de tráfico, pese a esto, estas aumentan la severidad de las hendiduras (Hernández, 2015).

Cuadro 11: Niveles de severidad de fisura en bloque

Nivel	Descripción
B (Bajo)	<ul style="list-style-type: none">• Fisuras sin sellar, de ancho promedio de 2 mm con presencia de desportillamiento menor.• Fisuras selladas de cualquier ancho, con material de sello en condiciones satisfactorias que no permiten la filtración de agua.
M (Mediano)	<ul style="list-style-type: none">• Fisuras sin sellar, de ancho promedio entre 2 y 5 mm.• Fisuras sin sellar de ancho promedio menor de 5 mm con presencia de desportillamiento menor.• Fisura sellada de cualquier ancho, sin desportillamiento o cuando éste es breve, pero el material de sello está en condiciones insatisfactorias.

(Hernández, 2015)



Figura 36: Fisura en bloque
(Hernández, 2015)

8.1. Obtención del polvo de llanta triturada

Se adquirió un quintal de polvo de llanta triturado de la empresa denominada Industria Recicladora de Guatemala S.A (INREGUA) que se especializa en dar un manejo integral adecuado de las llantas de desecho.



Figura 37: INREGUA
(Barrera, 2014)

8.2. Obtención del polvo del tereftalato de polietileno

Para la obtención del PET se recolectaron botellas elaboradas con el material de estudio. Debido a la poca o nula disponibilidad de empresas en prestar sus servicios para la trituración y reutilización de materiales reciclables para usos ajenos, se procedió a realizar el corte manualmente de las botellas recolectadas con una tijera al tamaño más pequeño posible, en el cual, se obtuvieron cuadros de aproximadamente de 5mm por 5mm. Se realizó este proceso hasta lograr obtener 15 gramos de tereftalato de polietileno.



Figura 38: PET recortado

8.3. Obtención de asfalto y agregados

El asfalto utilizado en el presente trabajo de investigación es el AC30, se seleccionó este asfalto debido a que éste es más rígido en comparación con el AC20 (asfalto que regularmente se utiliza en Guatemala), por lo cual, este aumento de rigidez ayuda a que la mezcla asfáltica sea más rígida. Actualmente un concreto asfáltico rígido es necesario debido al aumento de temperatura y a la carga vehicular que existe en el país. El asfalto se obtuvo de la empresa guatemalteca Perenco, los cuales operan en la refinería La Libertad que se encuentra ubicada en Petén, Guatemala.



Figura 39: Empresa proveedora de asfalto
(Perenco, 2020)

Los agregados utilizados en la investigación provienen de una planta de trituración ubicada en Jutiapa, Guatemala, el material de esta ubicación principalmente son rocas calizas (sedimentarias).



Figura 40: Planta proveedora de agregado

8.4. Desarrollo experimental

8.4.1. Normas

Cuadro 12: Normas utilizadas para los ensayos de los agregados pétreos

Agregados pétreos			
Ensayo	AASHTO	ASTM	NTG
Equivalente de arena	T-176-00	D-2419	N/D
Determinación de resistencia al desgates del agregado grueso por abrasión e impacto	T-96-02	C 131-0.1	41010 h20
Gravedad específica	T-85	C 127	41010 h8
Peso Unitario	N/D	C-29	41010 h2
Partícula plana o alargada	N/D	D 4791-10	41010 h12
Caras fracturadas	N/D	D 5821	N/D
Curva granulométrica	T-27	D-3515	41010 h1

Cuadro 13: Normas utilizadas para los ensayos del cemento asfáltico

Cemento asfáltico			
Ensayo	AASHTO	ASTM	NTG
Penetración	T-49	D-5	51005 h23
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02		
Punto de ablandamiento	T-53-08	D-36-06	51005 h32

Cuadro 14: Normas utilizadas para los ensayos del concreto asfáltico

Caracterización de la mezcla asfáltica			
Ensayo	AASHTO	ASTM	INV
Preparación de especímenes de prueba	T-245	D-1559	E-748
Gravedad específica de bulk	T-166	D-2726	E-733
Gravedad específica teórica máxima	T-209	D-2041	E-735
Porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas	T-269	D-3203	E-736
Estabilidad – Flujo Marshall	T-245	D-1559	E-748

Cuadro 15: Normas utilizadas para los ensayos del desempeño del concreto asfáltico

Desempeño del concreto asfáltico			
Ensayo	AASHTO	ASTM	NTG
Rueda de Hamburgo	N/D	T-324	N/D

8.4.2. Agregados minerales

Equivalente de arena

Este método establece un procedimiento rápido para determinar las proporciones relativas de finos plásticos o arcillosos en los áridos que pasan por el tamiz de 4,75 mm (N^o 4).

Equipo a utilizar

- Probeta graduada: De 30 ± 1 mm de diámetro interior y aproximadamente 400 mm de alto, graduado en milímetros hasta una altura de 380 mm (o graduado en mililitros hasta una capacidad de 270 ml) y provisto de un tapón hermético de caucho
- Pisón: Compuesto por los siguientes elementos: a) Una varilla de bronce de 6 mm de diámetro y 450 mm de largo, con hilo en ambos extremos. b) Un pie de bronce troncocónico, de 25 mm de diámetro basal y 20 mm de altura, con una perforación central con hilo para conectarlo a la varilla. c) Un par de guías que mantengan centrada la varilla en el eje de la Probeta. d) Una sobrecarga cilíndrica de acero laminado en frío de 50 mm de diámetro y 53 mm de altura, con una perforación central con hilo para conectarla a la varilla. Esta sobrecarga debe ser rectificadas de modo que el conjunto de varilla, pie, guías y sobrecarga tenga una masa de $1\text{kg} \pm 5\text{g}$
- Sifón: Compuesto por los siguientes elementos: a) Una botella de aproximadamente 4 l, provista de un tapón de caucho con dos perforaciones, a través de las cuales se

dispondrán dos tuberías de metal, vidrio, caucho o plástico. b) Una tubería de entrada de aire que penetre al interior de la botella sin tomar contacto con la solución y cuyo tramo exterior debe estar doblado en L. c) Una tubería de irrigación cuyo tramo interior penetre hasta 20 mm del fondo de la botella y cuyo tramo exterior sea una manguera de caucho o plástico de una longitud igual o mayor que 1,5 m provista de un sistema que regule el flujo de la solución (por ejemplo, una pinza con tornillo). d) Un tubo irrigador conectado al extremo exterior de la tubería de irrigación, de acero inoxidable de aproximadamente 500 mm de largo, 4 ± 1 mm de diámetro interior y con su extremo libre cerrado en forma de cuña. Debe tener dos perforaciones de $0,5 \pm 0,1$ mm de diámetro, una en cada cara plana de la cuña.

- Medida: Un recipiente de 85 ± 5 ml de capacidad.
- Tamiz: De tela de alambre y abertura cuadrada, de 4,75 mm (Nº 4) de abertura nominal
- Recipiente: Estanco y de capacidad igual o mayor que 4 l para preparar el reactivo y la solución de ensayo.
- Agitador mecánico: Con un desplazamiento horizontal de 200 ± 2 mm y una velocidad de agitación de 175 ± 2 ciclos/min.
- Reactivos: Cloruro de calcio anhidro, grado técnico, glicerina farmacéutica, formaldehído



Figura 41: Equipo utilizado para el ensayo de equivalente de arena

Procedimiento

1. Prepare el reactivo utilizando 240 g de cloruro de calcio anhidro, grado técnico, el cual debe de mezclar con 1 litro de agua destilada y se filtra. Luego se mezcla 1.085 g de glicerina farmacéutica con 25 g de formaldehido (solución 40 % de volumen / volumen) y se diluye con 2 litro de agua destilada.
2. Tome 22.5 ml de la solución base y diluya con 1 litro con agua destilada.
3. Pase la muestra original en estado húmedo por el tamiz de 4,75 mm; disgregue manualmente los terrones de material arcilloso, Reduzca por cuarteo hasta obtener material suficiente para llenar cuatro medidas y seque hasta masa constante en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$; deje enfriar a temperatura ambiente.
4. Coloque la botella del sifón con la solución de ensayo a aproximadamente 1 m sobre la superficie de trabajo.
5. Sifone la solución de ensayo en la probeta hasta que alcance un nivel de $100 \pm 5 \text{ mm}$.
6. Obtenga por cuarteo el material suficiente para llenar una medida.
7. Llene una medida; asiente el material golpeando el fondo de la medida contra la mesa de trabajo a lo menos 4 veces, enrase y vierta en la probeta.
8. Golpee firmemente el fondo de la probeta contra la palma de la mano hasta desalojar las burbujas de aire.
9. Deje la probeta en reposo por un período de 10 min.
10. Coloque el tapón y suelte la arena del fondo inclinando y sacudiendo el tubo.
11. Agite la probeta y su contenido mediante una agitación mecánica, debe de fijar la probeta en el agitador y este se debe de agitar durante un periodo de $45 \pm 1 \text{ seg}$.
12. Coloque la probeta sobre la mesa de trabajo, destápela y lave sus paredes interiores mediante el irrigador.
13. Introduzca el irrigador hasta el fondo de la probeta con un movimiento lento de penetración y torsión para remover todo el material.
14. Retire el irrigador en forma similar, regulando el flujo de la solución de modo de ajustar el nivel final a 380 mm.
15. Deje sedimentar por un periodo de $20 \text{ min} \pm 15 \text{ seg}$.
16. Al final del período de sedimentación lea y registre el nivel superior de la arcilla (N_t) aproximando al milímetro.
17. Introduzca el pisón en la probeta y hágalo descender suavemente hasta que quede apoyado en la arena. Registre el nivel superior de la arena (N_a) aproximando al milímetro.

18. Calcule el equivalente de arena de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando al 1% :

$$EA(\%) = \frac{Na}{Nt} * 100 \quad (1)$$

Donde:

EA = Equivalente de arena (%).

Na = Nivel superior de la arena (mm).

Nt = Nivel superior de la arcilla (mm).

Determinación de resistencia al desgates del agregado grueso por abrasión e impacto

Este ensayo en la máquina de los Ángeles ha sido ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa o la competencia de varias fuentes de agregados que tienen una composición mineral similar. Los resultados no permiten hacer automáticamente comparaciones válidas entre fuentes de agregados de diferente origen, composición y estructura.

Equipo a utilizar

- Máquina de los Ángeles
- Tamices
- Balanza
- Carga de esferas de acero - La carga debe consistir en esferas de acero con diámetro promedio de 46.8 mm (1 27/32 pulg) y con una masa entre 390 g y 445 g, cada una.



Figura 42: Máquina de los ángeles con vista en su interior

Procedimiento

1. La muestra de ensayo debe ser lavada y luego secada al horno a una temperatura entre $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$) hasta obtener una masa constante A continuación se separa en fracciones de tamaños individuales que se recombinan a la graduación indicada en el Cuadro 43, que más se acerque al rango de tamaños correspondiente del agregado suministrado para el trabajo.

Tamaño del tamiz, mm (pulg) (abertura cuadrada)		Masa de los tamaños indicados, g			
		Graduaciones			
Pasa	Retenido	A	B	C	D
37.5 (1½)-----	-----25 (1)	1250±25	---	---	
25.0 (1)-----	-----19.0 (¾)	1250±25	---	---	
19.0 (¾)-----	-----12.5 (½)	1250±10	2500±10	---	
12.5 (½)-----	-----9.5 (⅜)	1250±10	2500±10	---	
9.5 (⅜)-----	-----6.3 (¼)			2500±10	
6.3 (¼)-----	-----4.75 (No.4)			2500±10	
4.75 (No.4)----	-----2.36 (No.8)				5000±10
	Total:	5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

Figura 43: Graduaciones de las muestras de ensayo

2. Dependiendo de la graduación de la muestra de ensayo se debe usar como sigue:

Graduación	Número de esferas	Masa de la Carga, g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Figura 44: Cantidad de esferas en máquina de los ángeles

3. La muestra de ensayo y la carga de esferas de acero se colocan en la Máquina de Los Ángeles y se hace girar el tambor a una velocidad de 30 a 33 rpm, hasta alcanzar las 500 revoluciones.
4. Después del número prescrito de revoluciones, se descarga el material de la máquina y se hace una separación preliminar de la muestra en un tamiz más grueso que el tamiz de 1.70 mm (No.12). Se tamiza la porción final en un tamiz de 1.70 mm (No. 12).
5. Se lava el material más grueso que el tamiz de 1.70 mm (No.12) y se seca al horno a una temperatura entre $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$), hasta obtener una masa constante, y se pesa con una aproximación de 1g
6. Si el agregado está esencialmente libre de recubrimientos adherentes y de polvo, el requerimiento de lavado después del ensayo es opcional. Sin embargo, debe hacerse el lavado, si se trata de ensayos de referencia.
7. Se calcula la pérdida (diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra de ensayo) como un porcentaje de la masa original de la muestra de ensayo. Se reporta este valor como el porcentaje de pérdida

Gravedad específica

La densidad relativa se utiliza para calcular el volumen que ocupa el agregado en varias mezclas que contienen agregado, incluyendo concreto de cemento hidráulico, concreto bituminoso, y otras mezclas que son dosificadas o analizadas sobre la base de volumen absoluto.

Equipo a utilizar

- Balanza
- Contenedor de la muestra: Es una canasta de malla de alambre de 3.35 mm (No. 6) o una malla más fina, o una cubeta de ancho y altura aproximadamente igual, con una capacidad de 4 a 7 L para agregados de tamaño nominal máximo de 37.5 mm (1 ½ pulg) o menor, y un contenedor de mayor tamaño conforme se requiera para el ensayo de agregados de tamaños máximos mayores
- Tanque de agua: Este debe de estar libre de filtraciones, en el cual se coloca el contenedor de la muestra mientras está suspendido bajo la balanza.
- Tamices
- Horno

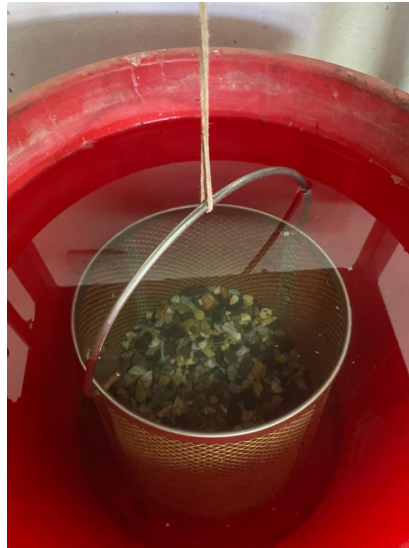


Figura 45: Ensayo de gravedad específica para agregados

Procedimiento

1. Mezclar a fondo la muestra del agregado y reducirla a la cantidad aproximada requerida, usando los procedimientos adecuados indicados en la práctica NTG 41010 h11 (ASTM C702). Rechazar todo el material que pasa el tamiz 4.75 mm (No. 4) por tamizado en seco y por lavado a fondo del material para remover el polvo u otros recubrimientos en la superficie.

2. Secar la muestra de ensayo en el horno a masa constante, a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$), dejarla enfriar al aire a temperatura ambiente, de 1 a 3 h, para muestras de tamaño nominal máximo de 37.5 mm ($1 \frac{1}{2}$ pulg), o por un tiempo mayor para tamaños más grandes, hasta que el agregado se haya enfriado a una temperatura adecuada para su manejo (Aproximadamente 50°C).
3. A continuación, se debe sumergir el agregado en agua a temperatura ambiente por un período de 24 ± 4 h. Cuando se utilicen agregados livianos Grupo II de acuerdo a la especificación NTG 41065 (ASTM C330) o ASTM C332, sumergir el agregado en agua a temperatura ambiente por un periodo de 72 ± 4 h, revolver por al menos un minuto a cada 24 h.
4. Cuando los valores de absorción y densidad relativa (gravedad específica) vayan a ser usados para el proporcionamiento de mezclas de concreto en las que los agregados estarán en su estado natural de humedad, el requisito de secado inicial en el inciso 8.1 es opcional, y si las superficies de las partículas de la muestra se han mantenido continuamente humedecidas hasta su ensayo, el requisito del inciso 8.1 de inmersión en agua por 24 ± 4 h también es opcional.
5. Remover la muestra de ensayo del agua y rodarla dentro de una tela absorbente grande, hasta que desaparezca el brillo del agua o humedad superficial desaparezca. Luego frotar individualmente las partículas. Se permite el uso de un flujo de aire para asistir en la operación de secado. Se debe tener cuidado de evitar la evaporación del agua de los poros del agregado durante la operación de secado superficial.
6. Determinar la masa de la muestra de ensayo en la condición saturada de superficie seca (sss). Registrar esta y las masas subsecuentes, con una aproximación de 0.5 g o del 0.05 % de la masa de la muestra, la que sea mayor.
7. Secar la muestra de ensayo en el horno, hasta masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$, enfriarla en aire a temperatura ambiente del laboratorio por 1 a 3 h, o hasta que el agregado se halla enfriado a una temperatura confortable para su manejo (aproximadamente 50°C) y determinar su masa.
8. Calcular la densidad relativa (gravedad específica) (s) según el agregado seco al horno, como sigue:

$$s = \frac{A}{(B - C)} \quad (2)$$

Donde:

A = Masa de la muestra de ensayo, seca al horno (s), en el aire, g.

B = Masa de la muestra de ensayo, saturada de superficie seca (sss) en el aire, g.

C = Masa aparente de la muestra de ensayo saturada en el agua, g.

9. Calcular la densidad relativa (gravedad específica) (sss) según agregado saturado de superficie seca como sigue:

$$sss = \frac{B}{(B - C)} \quad (3)$$

10. Calcular el porcentaje de absorción, como sigue:

$$\text{Absorción, \%} = \frac{(B - A)}{A} * 100 \quad (4)$$

Peso unitario

Este método de ensayo se refiere a la determinación de la densidad aparente (“peso unitario”) entre las partículas de los agregados a granel en condición compactada o suelta

Equipo a utilizar

- Balanza
- Varilla de apisonado. Una varilla recata y redonda de acero de 16 mm (5/8 de pulg) de diámetro y aproximadamente 600 mm (24 pulg) de largo, que cuente con ambos extremos redondeados formando una punta semiesférica, cuyo diámetro es 16 mm (5/8 de pulg).
- Recipiente. Un recipiente cilíndrico de metal, preferible con agarraderos. Debe ser hermético, con la parte superior e inferior seguras y parejas, y lo suficientemente rígido como para mantener su forma luego de un uso rudo. El recipiente debe tener una altura de aproximadamente igual a su diámetro, pero en ningún momento caso menos del 80 % o mayor de 150 % del diámetro
- Pala o cucharón. Una pala o cucharón de tamaño adecuado para llenar el recipiente con agregados.



Figura 46: Recipiente y agregados utilizados para medir el peso unitario

Procedimiento general

1. La toma de muestras debe hacerse generalmente de acuerdo con la práctica ASTM C172 o ASTM D75, y la reducción a la muestra de acuerdo con la práctica C 702.
2. El tamaño de la muestra debe ser de aproximadamente un 125 % a un 200 % de la cantidad requerida para llenar el recipiente, y debe manejarse tratando de evitar la segregación. Secar la muestra de agregados hasta obtener una masa esencialmente constante, preferiblemente en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$

Procedimiento varillado

1. Llenar el recipiente a un tercio y nivelar la superficie con los dedos. Varillar la capa de agregado dando 25 golpes con la varilla de apisonado, distribuyéndolos uniformemente sobre la superficie.
2. 4 Llenar el recipiente a dos tercios de la capacidad total y vuelva a nivelar y varillar como se hizo anteriormente. Finalmente, llenar el recipiente hasta rebosarlo y varillar nuevamente tal como lo hizo con anterioridad.
3. Nivelar la superficie de agregados con los dedos o con una regla enrasadora, de tal manera que cualquier proyección ligera de los pedazos más grandes del agregado grueso equilibren aproximadamente los vacíos más grandes en la superficie por debajo del tope del recipiente.
4. Al varillar la primera capa no permita que la varilla toque con fuerza el fondo del recipiente. Al varillar la segunda y tercera capas, aplique bastante fuerza, pero no más de la necesaria como para ocasionar que la varilla penetre en la capa previa de agregados.
5. Determinar la masa del recipiente, más su contenido y por separado la masa del recipiente, y registre los valores al 0.05 kg (0.1 lb) más cercano

Procedimiento de paleo

1. Llenar el recipiente hasta rebosarlo con ayuda de una pala o cucharón, descargando los agregados desde una altura de no más de 50 mm (2 pulg) por encima del tope del recipiente. Debe cuidar, a fin de evitar, en lo posible, la segregación de las partículas de las cuales se compone la mezcla.
2. Nivelar la superficie del agregado con los dedos o con una regla enrasadora, de tal manera que cualquier proyección ligera de los pedazos más grandes del agregado grueso equilibren aproximadamente los vacíos más grandes en la superficie por debajo del tope del recipiente.

Cálculos La siguiente operación aplica para el procedimiento varillado y el de paleo:

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (5)$$

Donde:

M = Densidad aparente de los agregados kg/m^3 (lb/pie^3)

G = Masa de los agregados más el recipiente, kg (lb)

T = Masa del recipiente, kg (lb).

V = Volumen del recipiente m^3 (pie^3)

Partícula plana o alargada

Este método de ensayo provee un medio para comprobar el cumplimiento con especificaciones que limitan tales partículas o para determinar las características relativas a la forma de los agregados gruesos.

Equipo a utilizar

- Dispositivo de calibración proporcional. Consiste en una placa de base con dos pines fijos y un brazo oscilante montado entre ellos de modo que las aberturas entre los extremos del brazo oscilante y los pines fijos mantengan una relación constante. La posición del eje puede ser ajustada para proveer la relación de dimensiones de abertura.
- Balanza



Figura 47: Dispositivo de calibración proporcional

Procedimiento

1. Tamizar la muestra de ensayo de acuerdo con el método de ensayo NTG 41010 (C136). Usando el material retenido en el tamiz de 9.5mm (3/8 pulg) o en el tamiz de 4.75 mm (No.4), como se requiera por la especificación que se esté usando, se debe reducir cada fracción de tamaño presente en una cantidad mayor del 10 % o más de la muestra, y de acuerdo con la práctica NTG 41010 h11 (C702) hasta que se obtengan aproximadamente 1010 partículas de cada fracción de tamaño requerido. Las fracciones de tamaño que contengan menos del 10 % de la masa original total de la muestra, no se someten a ensayo y son descartadas
2. Ensayar las partículas en cada fracción de tamaño y colocarlas en uno de los cuatro grupos siguientes: (1) Partículas planas (2) Partículas alargadas (3) Partículas que cumplen con ambos criterios de (1) y (2); (4) Partículas que no son ni planas ni alargadas, y no cumplen con los criterios del grupo (1) ni del grupo (2).
3. Cada una de las partículas debe ser sujeta al ensayo de partícula plana y al ensayo de partícula alargada
4. Si la partícula se determina como plana pero no alargada se pone en el grupo de las “planas” si se determina que es alargada pero no plana se pone en el grupo de las “alargadas”. En algunos es posible que alguna partícula cumpla con los requisitos tanto de partícula plana como de alargada. En este caso, la partícula se pone en el grupo de partículas que cumplan con los criterios de ambos grupos. Si la partícula no se planta ni es alargada, se pone en el grupo que no cumple con los criterios del grupo (1) o del grupo (2).
5. Usar el dispositivo de calibración posicionando a la relación de diversiones adecuada como se indica en la Figura 48, y proceder como sigue:

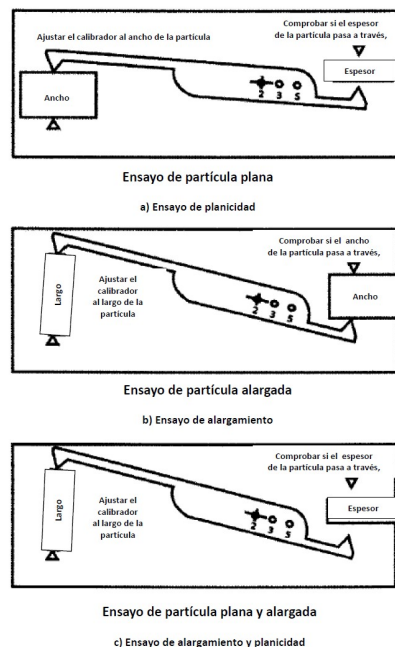


Figura 48: Determinación de relación para partícula plana o alargada

Caras fracturadas

Este procedimiento de prueba determina la cantidad (porcentaje) de partículas con cara fracturada, por medio de una inspección visual que cumpla con ciertos requisitos específicos.

Equipo a utilizar

- Balanza
- Tamices
- Cuarteador
- Espátula. Se utilizará para ayudar en la clasificación de las partículas

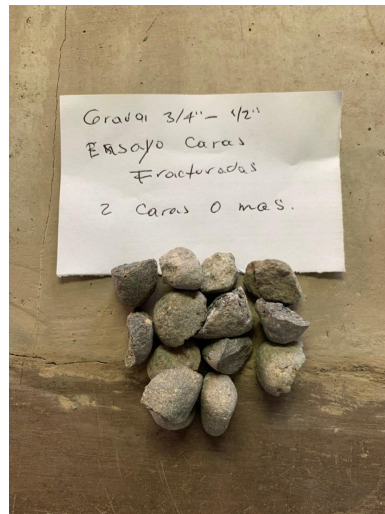


Figura 49: Caras fracturas en 2 caras o más

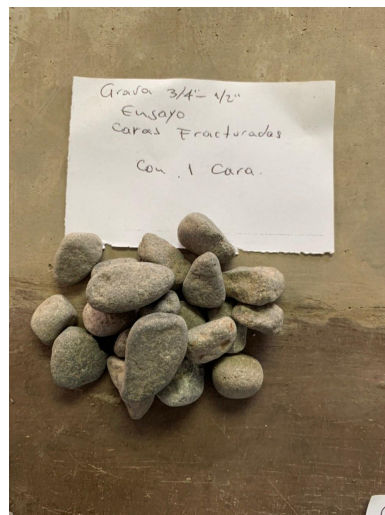


Figura 50: Caras fracturadas en 1 cara

Procedimiento

1. Seque al aire la muestra representativa antes del proceso de gradación gruesa para que haya una separación limpia de las partículas. Se podría usar una muestra total + No. 4 (4.75 mm) para la prueba, pero más comúnmente el material + No. 4 (4.75 mm) se dividirá en fracciones representativas. El tamaño mínimo de las muestras será el siguiente:

Tamaño máximo nominal del tamiz	Tamaño mínimo de la muestra	
	inch (mm)	libras
3/8 (9.5)	0.5	200
1/2 (12.5)	1	500
3/4 (19.0)	3	1500
1 (25.0)	6.5	3000
1 1/2 (34.5)	16.5	7500
2 (50)	33	15000
2 1/2 (63)	66	30000
3 (75)	132	60000
3 1/2 (90)	198	90000

Figura 51: Cantidad mínima de muestra para el ensayo de partículas con caras fracturadas

2. Para el agregado con un tamaño máximo nominal de 3/4 pulg. (19.0 mm) o mayor, la muestra de prueba se puede separar en el tamiz de 3/8 pulg. (9.5 mm). La porción que pasa el tamiz de 3/8 pulg. (9,5 mm) se puede reducir aún más a un mínimo de 0,5 lbm (200 g). Esto reducirá el número de partículas que se separarán durante el procedimiento. En este caso, se determina el porcentaje de partículas fracturadas en cada porción y se calcula un porcentaje promedio ponderado de partículas fracturadas.
3. Lave la muestra sobre el tamiz designado para la determinación de partículas fracturadas para eliminar cualquier material fino restante y seque hasta obtener una masa constante. Determine la masa de la muestra de prueba, y cualquier determinación subsiguiente de masa, al 0.1 % más cercano de la masa de muestra seca original.
4. Extienda la muestra de prueba seca sobre una superficie limpia y plana lo suficientemente grande como para permitir una inspección cuidadosa de cada partícula. Para verificar que una partícula cumple con los criterios de fractura, sostenga la partícula agregada para que la cara se vea directamente. Si la cara constituye al menos una cuarta parte del área de la sección transversal máxima de la partícula de roca, considérela como una cara fracturada.
5. Usando la espátula o una herramienta similar, sepárelas en dos categorías: (1) partículas fracturadas según si la partícula tiene el número requerido de caras fracturadas, y (2) partículas que no cumplen con los criterios especificados Si el número requerido de caras fracturadas no se da en las especificaciones aplicables, la determinación se realizará sobre la base de un mínimo de una cara fracturada.
6. Determine la masa o el recuento de partículas en la categoría de partículas fracturadas y la masa o recuento de las partículas que no cumplen los criterios de fractura especificados. Use la masa para calcular el porcentaje de partículas fracturadas a menos que se especifique el porcentaje por recuento de partículas.

7. Si se especifica más de un número de caras fracturadas (por ejemplo, 70 % con una o más caras fracturadas y 40 % con dos o más caras fracturadas), repita el procedimiento en la misma muestra para cada requisito.
8. Determine el porcentaje de partículas fracturadas:

$$P = \frac{F}{F + N} * 100 \quad (6)$$

Donde:

P = Porcentaje de partículas con un número específico de caras fracturadas

F = Masa o conteo de partículas fracturadas con al menos el número especificado de caras fracturadas

N = Masa o conteo de partículas en la categoría no fracturada que no cumple con los criterios de partículas fracturadas.

Granulometría

Las mezclas asfálticas se pueden presentar según su tamaño máximo de agregado de acuerdo a la ASTM D 3515 o a la Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la dirección general de Caminos. En estos documentos se presentan los valores máximos y mínimos de agregado para la mezcla asfáltica, a partir de esta información se genera la curva granulométrica a utilizar en la mezcla. Para diseñar una mezcla asfáltica, primero se define cuál será el tamaño máximo de agregado y luego se utiliza en el Cuadro 16 para conocer los valores de los porcentajes en masa que pasa la serie de tamices utilizados. Posteriormente, se eligen los valores de los porcentajes que pasa para cada tamiz, construyendo así la curva granulométrica; quedando definido el diseño de mezcla asfáltica (Gómez, 2018).

Cuadro 16: Tipos de granulometría para concretos asfálticos

Tamaño del Tamiz (mm)	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T11)					
	Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal ⁽¹⁾					
	A (50,8 mm)	B (38,1 mm)	C (25,4 mm)	D (19 mm)	E (12,5 mm)	F (9,5 mm)
63,00	100					
50,00	90-100	100				
38,10	-	90-100	100			
25,00	60-80	-	90-100	100		
19,00	-	56-80	-	90-100	100	
12,50	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9,50	-	-	-	56-80	-	90-100
4,75	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2,36	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0,30	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0,075	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

(Gómez, 2018)

En el presente trabajo se decidió trabajar con una mezcla asfáltica tipo D, debido a que el agregado utilizado tiene como agregado máximo de 19 mm (3/4"). Luego se propuso el diseño de la curva granulométrica y se verificó que cumpliera con los límites del Cuadro 16

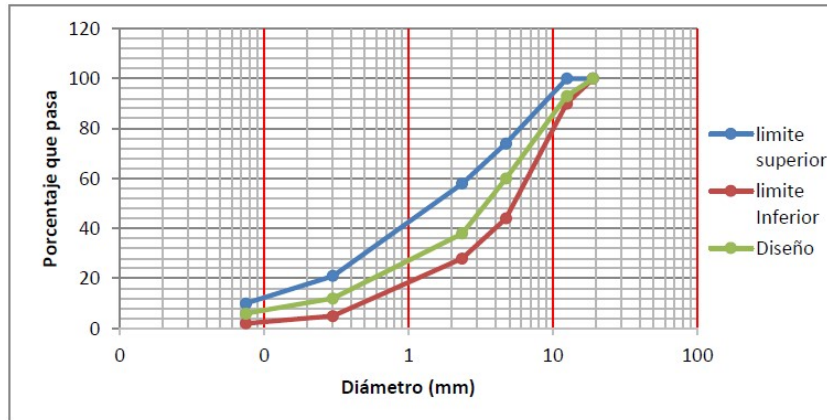


Figura 52: Ejemplo de curva granulométrica para un diseño de concreto asfáltico (Gómez, 2018)

8.4.3. Cemento asfáltico

Penetración

El ensayo de penetración se usa como una medida de consistencia. Altos valores de penetración indican consistencias más blandas

Equipo a utilizar

- Penetrómetro. está constituido por un mecanismo que permita el movimiento vertical sin rozamiento apreciable de un vástago o soporte móvil al cual se pueda fijar firmemente por su parte inferior, la aguja de penetración; y que permita, además, la colocación sobre el mismo, de diferentes cargas suplementarias;
- Base de apoyo. Se utiliza para la colocación del recipiente con la muestra, de forma plana y que forme un ángulo de 90 grados con el sistema móvil, así como de un nivel de burbuja y tornillos de nivelación.
- Aguja de penetración. La aguja será de acero inoxidable endurecido y templado, (Grado 440 C o similar), con una dureza Rockwell HRC54 a HRC60, la aguja estándar tendrá unos 50 mm (2 plg) de longitud y la larga 60 mm (2.4 plg) entre 1.00 y 1.02 mm (0.0394 a 0.0402) de diámetro, con uno de sus extremos simétricamente afilado hasta formar un cono de ángulo comprendido entre 8.7° y 9.7° en toda su longitud
- Molde para muestra
- Baño de agua

- Dispositivo medidor de tiempo
- Termómetros



Figura 53: Equipo utilizado para el ensayo de penetración

Procedimiento

1. Caliente la muestra por el tiempo mínimo necesario para asegurar que esté lo suficientemente fluida. Agite para asegurar homogeneidad. Evite la incorporación de burbujas de aire en la muestra.
2. Vierta la muestra dentro del contenedor a una profundidad tal que al enfriarse a la temperatura de ensayo, la profundidad de la muestra sea al menos 120
3. Permita el enfriamiento a una temperatura entre 15 y 30° C, (59 y 86° F), por 45 minutos a 1.5 horas, si se emplean contenedores pequeños (33 x 16 mm o menos), y entre 1 y 1.5 horas para contenedores medianos (55 x 35 mm) y 1.5 a 2 horas para contenedores de mayor tamaño.
4. Finalmente, se sumergen los recipientes en el baño de agua a la temperatura especificada, manteniéndolos así durante los mismos períodos de enfriamiento.

5. Examine el soporte de la aguja y guía para establecer la ausencia de agua y otros materiales externos. Limpiar la aguja de penetración con tolueno u otro disolvente adecuado, secar con un paño limpio, e inserte la aguja en el penetrómetro. Salvo que se especifique otra carga, se coloca el peso suplementario de 50 g sobre el vástago, para obtener la masa móvil total de 100 ± 0.1 g.
6. Si las pruebas se hacen con el penetrómetro en el baño, colocar el recipiente de la muestra directamente en el soporte sumergido del penetrómetro. Mantenga el recipiente de la muestra completamente cubierta con agua en el baño. Si las pruebas se hacen con el penetrómetro fuera del baño, coloque el recipiente de la muestra en el disco de transferencia, cubrir completamente el recipiente con agua del baño a temperatura constante y coloque el plato de transferencia en el stand del penetrómetro.
7. Use el nivel de indicador para asegurar que el aparato este nivelado.
8. Ponga a 0 la aguja indicadora de la penetración o tome nota de su lectura. Posicione la aguja descendiendo lentamente hasta que la punta haga contacto con la superficie de la muestra realice esto con la punta de la aguja haciendo contacto real con su imagen reflejada sobre la superficie de la muestra, para lo cual empleé una fuente luminosa. Libere rápidamente el soporte de la aguja por el periodo del tiempo especificado (5 segundos) y ajuste el instrumento para medir la distancia penetrada en decimos de milímetros. Si el contenedor se mueve, ignore el resultado
9. Haga un mínimo de tres penetraciones en la superficie de la muestra en puntos distanciados al menos 10 mm de la pared de la cápsula y a no menos de 10 mm entre uno y otro. Si se usa el disco de transferencia, retorne la muestra y el transportador al baño de agua entre determinaciones; use una aguja limpia para cada determinación.

Recuperación elástica por torsión

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.

Equipo a utilizar

- Aparato de torsión. Compuesto por un cilindro metálico, baño de agua, molde para la muestra, semicorona con escala graduada de 0 a 180° y barra indicadora, que permite tomar la medición sobre la semicorona graduada.
- Termómetro
- Cronómetro
- Estufa. Para calentar la muestra de prueba.
- Varilla. Para agitado, con extremos redondeados con diámetro de 13 mm aproximadamente.



Figura 54: Equipo utilizado para el ensayo de recuperación elástica por torsión

Procedimiento

1. De la muestra de cemento asfáltico modificado, 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 necesario para llenar el molde para la muestra del aparato de torsión 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 dicho molde, cuidando que durante su calentamiento la temperatura no exceda de 130°C y que esta operación se realice en un lapso menor de 30.min.
2. Se centra y fija el molde para la muestra dentro del baño, antes de agregar el agua.
3. Se ajusta el cilindro metálico de tal forma que su base inferior quede a una distancia de 20 mm del fondo del molde, previamente al vertido de la muestra.
4. Se vierte en el molde, agitándola perfectamente y haciéndola pasar cuidadosamente a través de la malla N°50, formando un chorro delgado que se mueva por toda la circunferencia del molde, evitando la formación de burbujas de aire y en cantidad suficiente que permita el enrasamiento de dicho molde usando como referencia la marca grabada sobre el cilindro metálico a 10 mm de su base inferior, es decir, que el cilindro metálico quede sumergido dentro de la muestra precisamente estos 10 mm.
5. Se deja enfriar el conjunto formado por el molde, la muestra y el cilindro metálico, durante 1·h como mínimo, hasta alcanzar la temperatura ambiente.

6. Se hace circular agua por el baño a una temperatura de $25 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ 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.
7. 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, es decir, se lleva la barra indicadora de 180° a 0° , en un tiempo comprendido entre 3 y 5 s. Hecho esto, se retira inmediatamente el pasador para que no interfiera con el desarrollo posterior de la prueba.
8. Transcurridos $30 \text{ min} \pm 15 \text{ s}$, se registra la lectura indicada por la barra sobre la semicorona graduada, como el valor del ángulo recuperado (L).
9. Se reporta como resultado de la prueba, el porcentaje de recuperación con respecto al ángulo inicial de 180° , utilizando la siguiente expresión:

$$Re = \frac{L}{180} * 100 \quad (7)$$

Donde:

Re = Recuperación elástica por torsión (%)

L = Ángulo recuperado

Punto de ablandamiento

El punto de ablandamiento es útil para clasificar los bitúmenes y es un elemento para establecer la uniformidad de los embarques o fuentes de suministro, es un indicativo de la tendencia del material a fluir a temperaturas elevadas durante su vida de servicio.

Equipo a utilizar

- Anillos de bronce, de bordes cuadrados
- Platos de base
- Dos bolas de acero, de 9.5 mm de diámetro (3/8 plg), pesando cada una $3.5 \pm 0.05 \text{ g}$
- Guías de contacto de las bolas. Dos guías de bronce para centrar las bolas de acero, una para cada anillo.
- Baño. Recipiente de vidrio que se pueda calentar, con un diámetro interno no menor de 85 mm, y altura entre la base y el borde de 120 mm como mínimo, con capacidad de 800 mL
- Soporte de anillos y montaje completo. Un soporte de bronce diseñado para sostener los dos anillos en posición horizontal.
- Termómetros



Figura 55: Equipo utilizado para el punto de ablandamiento

Procedimiento

1. Se calienta la muestra de material bituminoso en forma cuidadosa, se agita frecuentemente para evitar sobrecalentamientos localizados, hasta asegurar que esté suficientemente fluida para poderla verter. Agitarse con cuidado para evitar la formación de burbujas en la muestra.
2. El calentamiento de la muestra de asfalto no debe tomar más de 2 horas; y, en ningún caso, la temperatura será mayor que 110°C (200°F) por encima del punto de ablandamiento esperado
3. Se calientan los dos anillos de bronce sin el plato de base, aproximadamente a la temperatura de su punto de fluidez y se colocan en el plato de base, tratado con un agente antiadherente.
4. Se vierte, con un ligero exceso, el producto bituminoso dentro de los anillos y se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos. Para materiales que estén blandos a la temperatura ambiente, se enfrían los especímenes, al menos durante 30 minutos a una temperatura inferior, 10°C (18°F) por debajo del punto de ablandamiento esperado. Desde el momento en que se forman los discos, no deberán transcurrir más de 240 minutos hasta la terminación del ensayo.
5. Cuando los especímenes estén fríos, se corta el exceso de material bituminoso de la parte superior, con un cuchillo o espátula precalentada, para que la superficie del disco coincida con el nivel superior del anillo.
6. Se escoge, dependiendo del punto de ablandamiento esperado, el líquido y el termómetro adecuado, para esta situación se escoge el Baño con agua destilada recién hervida,

para ablandamiento esperado entre 30° y 80°C (86° y 176°F); se debe usar un termómetro 15C ó 15F. La temperatura, al comenzar el baño, deberá ser de 5° ± 1°C (41° ± 2°F).

7. Se hace el montaje de los aparatos en un laboratorio ventilado, colocando los anillos con los especímenes, las guías para las bolas y los termómetros en posición y se llena el baño con el líquido apropiado hasta una altura de 105 ± 3 mm (4 1/8 plg ± 1/8 plg). Usando unas tenazas apropiadas, se colocan las dos bolas en el fondo del baño para que adquieran la misma temperatura de iniciación que el resto del montaje por al menos 5 minutos
8. Se coloca todo el conjunto del baño, en agua con hielo si es necesario o se calienta muy suavemente, para alcanzar y mantener durante 15 minutos la temperatura de iniciación apropiada. Se debe cuidar de no contaminar el líquido del baño.
9. Usando otra vez las tenazas, se coloca cada una de las bolas en la guía para su centrado.
10. Se calienta el baño en forma pausada, para asegurar que la velocidad de elevación de la temperatura sea constante a 5° C/minuto (9° F/minuto). Se protege el baño de corrientes de aire usando pantallas, si es necesario. No se debe promediar la velocidad de elevación de la temperatura durante el período de ensayo. La máxima variación permitida para un período de 1 minuto, después de transcurridos los 3 primeros minutos, será de ± 0.5° C (± 1° F). Se rechaza cualquier ensayo en el cual la velocidad de elevación de la temperatura no esté dentro de estos límites.
11. Se anota para cada anillo y bola, la temperatura indicada por el termómetro en el momento en que el producto bituminoso que rodea la bola toque el fondo del plato de base. No se debe hacer corrección por la parte emergente del termómetro. Si la diferencia entre las dos temperaturas excede de 1° C (2° F), se repite el ensayo.

8.4.4. Colocación de polímeros

Antes de mezclar los polímeros con el cemento asfáltico, estos se tamizarán para obtener y utilizar las partículas más pequeñas, principalmente las que se encuentran retenidas en el tamiz No. 50. Los polímeros de polvo de llanta triturada y de tereftalato de polietileno se colocarán en el Concreto asfáltico como aditivo para no alterar la configuración del esqueleto mineral. Este se aplicará principalmente al cemento asfáltico, esto se logrará colocando un 3% del polímero, luego se mezclará el cemento junto con el polímero ya sea polvo de llanta o PET durante 2 horas para lograr una buena homogenización



Figura 56: Equipo utilizado para el proceso de mezclado del aditivo con el asfalto



Figura 57: Mezclado del aditivo con el asfalto

8.4.5. Método Marshall

Requisitos de un concreto asfáltico

El concreto asfáltico, debe de cumplir con los requisitos del método de diseño establecido en las Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, de la Dirección General de Caminos.

Cuadro 17: Requisitos para un concreto asfáltico

MÉTODO DE DISEÑO ⁽¹⁾	VALORES LÍMITES	
	Mínimo	Máximo
1. <u>MARSHALL</u> (AASHTO T245)		
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de compactación (generalmente comprendida entre 130 y 140 °C) de pastilla para producir una viscosidad de • Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen ⁽²⁾ • Estabilidad • Fluencia en 0,25 mm (0,01 pulg.) <ul style="list-style-type: none"> • Tránsito < 10⁶ ESAL • Tránsito > 10⁶ ESAL • Relación estabilidad fluencia (lb/0,01 pulg) • Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada ⁽³⁾ • Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM) • Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto <ul style="list-style-type: none"> • Tránsito < 10⁶ ESAL • Tránsito > 10⁶ ESAL • Relación finos bitumen ⁽⁴⁾ • Sensibilidad a la humedad AASHTO T283 Resistencia retenida • Partículas recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado AASHTO T195 	0,25 Pa-s o 250 cS 75 5 338 N (1 200 libras) 8 8 120 3 Ver tabla XI 65 65 0,6 80 % 95 %	0,31 Pa-s o 310 cS 75 16 14 275 5 78 75 1,6 No aplicable

(Gómez, 2018)

Cuadro 18: Porcentaje de vacíos del agregado mineral

Tamaño Nominal Máximo del Agregado en mm	Porcentaje de Vacíos del Agregado Mineral (VAM)			
	Marshall			Superpave
	3% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾	5% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾
9,50	14	15	16	15
12,50	13	14	15	14
19,00	12	13	14	13
25,00	11	12	13	12
37,50	10	11	12	11
50,00	9,5	10,5	11,5	No aplicable

(Gómez, 2018)

Preparación de los especímenes de prueba

Equipo a utilizar

- Horno
- Termómetros adecuados para medir la temperatura del asfalto, los agregados y la mezcla.
- Balanza para pesar material y probetas compactadas.
- Tamices.
- Recipiente para mezclar.
- Cucharones o espátulas.
- Molde cilíndrico con collar de extensión y placa de base plana para moldear probetas.
- Martillo de compactación de operación manual, consiste en un dispositivo de acero con una base plana circular de compactación, con una articulación de resorte y un pisón deslizante de 4,54 kg de masa total, montado en forma que proporcione una altura de caída de $457,2 \pm 1,5$ mm.
- Pedestal de compactación, pieza prismática de madera de base cuadrada, de 203,2 mm de lado y 457,2 mm de altura. Provista en su cara superior con una platina cuadrada de acero de 304,8 mm de lado y 25,4 mm de espesor; esta debe de estar firmemente sujeta al pedestal.
- Dispositivo con resorte de tensión, diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal. Debe de sostener en su posición el molde, el collar y la placa de base durante la compactación de la probeta.



Figura 58: Probeta de concreto asfáltico convencional y modificado 1

Procedimiento

1. Para una graduación de agregado previamente establecida, preparar una serie de probetas con diferentes contenidos de asfalto, desde un 4 hasta un 6.5 % (con incrementos de 0,5 % en masa entre ellos), del peso total de la mezcla de agregados. Se prepararán tres probetas para cada contenido de asfalto. Por lo tanto, se necesita realizar, por lo menos quince probetas por cada diseño de mezcla. Para cada probeta se utilizan 1 100 g de mezcla de agregados, incluyendo el relleno mineral.
2. Secar los agregados y separar por tamizado en fracciones de diferentes tamaños.
3. Calentar el cemento asfáltico a una temperatura correspondiente para producir una viscosidad cinemática entre 0,15 y 0,19 Pa-s (150 y190 cS).
4. En bandejas taradas, pesar las cantidades de cada porción de agregados, previamente calculadas, de acuerdo con el diseño de mezcla propuesto para la fabricación de una probeta. La suma de los pesos acumulados de los agregados debe de ser igual a 1 100 g.
5. Calentar los agregados hasta llegar a una temperatura aproximada de 110 °C. Con la ayuda de un recipiente de mezclado y una espátula, mezclar en seco durante un tiempo adecuado que permita obtener una buena combinación de los agregados, sin que se presente una pérdida de temperatura en la mezcla.
6. Verter la cantidad requerida de cemento asfáltico en la mezcla de agregados.
7. Mezclar los agregados con el cemento asfáltico lo más rápidamente posible hasta obtener una mezcla completa y homogénea. Esta mezcla se debe realizar en una placa de calentamiento hasta que alcance una temperatura de 140 °C.
8. Simultáneamente, con la preparación de la mezcla, el conjunto de molde, collar y placa de base, se calientan en un baño de agua a temperatura de 60 °C
9. Secar y armar el conjunto de moldeo de las probetas, aplicándole previamente aceite para desencofrar.
10. Verter la mezcla en el molde y apisonar con una espátula 15 veces alrededor del perímetro y 10 sobre el interior. Esto se realiza para lograr un mejor acomodo de las partículas de la mezcla en el molde.
11. Compactar la mezcla aplicando 75 golpes, por medio del martillo de compactación. La temperatura de la mezcla inmediatamente, antes de la compactación, deberá ser aproximadamente de 140 °C.
12. Se procede a retirar el collar, se da vuelta al molde y se vuelve a montar este en el pedestal y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la probeta.
13. Después de la compactación, se retira el collar y los moldes. Se deja enfriar la muestra al aire dentro del molde. 24 horas después de la compactación se desencofra.

Gravedad específica de Bulk

Equipo a utilizar

- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para que las gravedades se puedan calcular al menos con cuatro cifras significativas. Deberá estar provista de un dispositivo de suspensión adecuado, que permita pesar el espécimen dentro del agua suspendido bajo el centro del platillo de la balanza.
- Baño con agua para la inmersión del espécimen. Este deberá estar provisto de un rebosadero para mantener el agua a nivel constante.



Figura 59: Peso de probeta suspendida en agua

Procedimiento

1. Determinar la masa del espécimen seco, pesándolo después de que haya permanecido al menos durante 1 hora a temperatura ambiente.
2. Sumergir la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente durante 5 minutos.
3. Sacar y secar superficialmente la muestra para posteriormente pesarla y obtener el peso saturado.
4. Sumergir la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente, se pesa estando suspendida en el agua

5. Se procede a calcular la gravedad específica de la muestra utilizando la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad (8)$$

Donde:

G_{mb} = Gravedad específica de bulk de las probetas

A = Masa seca del espécimen en aire (g)

B = Masa saturada del espécimen en aire (g)

E = Masa del espécimen sumergido en agua(g)

Gravedad específica teórica máxima

El equipo a utilizar

- Picnómetro de vacíos de metal o plástico con un diámetro de 180 a 260 mm y una altura no menor de 160 mm. Este debe estar equipado con una tapa transparente, asegurada con un empaque de caucho y con una conexión para la aplicación del vacío.
- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para que las gravedades específicas de las muestras se puedan calcular al menos con cuatro cifras significativas.
- Bomba de vacío capaz de evacuar el aire del recipiente de vacío hasta una presión residual de 4 kPa (30 mm Hg) o menos.
- Trampa de humedad: dispositivo utilizado para reducir la cantidad de vapor de agua que puede entrar en la bomba, colocado entre la bomba de vacío y el picnómetro.
- Manómetro de presión residual: para confirmar que se está aplicando la presión al recipiente, debe ser capaz de medir una presión residual de 4 kPa (30 mm Hg) o menos.
- Válvula de purga: para facilitar el ajuste del vacío que está siendo aplicado al recipiente y la liberación lenta de la presión de vacío.
- Dispositivo de agitación mecánica, que sea capaz de aplicar una agitación suave pero consistente a la muestra.



Figura 60: Equipo utilizado para la gravedad específica teórica máxima

Procedimiento

1. Una vez que la muestra está seca y se encuentre tibia, desintegrar con las manos logrando separar sus partículas, teniendo cuidado de no fracturarlas. Las partículas de la porción del agregado fino no deben de ser mayores de 6 mm.
2. Verter la muestra directamente en el picnómetro previamente tarado. Se pesa el recipiente con la muestra y se designa la masa neta (únicamente la masa de la muestra).
3. Agregar agua a temperatura ambiente, suficiente para cubrir la muestra por completo. Se recomienda que el espejo de agua esté a una altura de por lo menos 1" por encima de la mezcla.
4. Colocar el picnómetro con la muestra y agua sobre el dispositivo de agitación mecánica y asegurarlo a la superficie de este. Activar la bomba de vacío, poner en marcha la agitación e inmediatamente, por medio de la válvula de presión residual, se busca que la presión de vacío se encuentre dentro de un rango de 25 a 30 psi. La presión de vacío se deberá alcanzar en un tiempo no mayor a 1 minuto y, una vez alcanzado, se continuará el vacío y la agitación durante 15 minutos.
5. Una vez transcurridos los 15 minutos, liberar gradualmente la presión de vacío usando la válvula de purga.
6. Llenar lentamente el picnómetro con agua, teniendo el cuidado de no introducir aire dentro de la muestra. Secar cualquier humedad presente en el exterior del matraz y de

la placa de vidrio templado. Se determina la masa del picnómetro más la placa, más la muestra, más agua.

7. Calcular la gravedad específica teórica máxima por medio de la siguiente expresión:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \quad (9)$$

Donde:

Gmm = Gravedad específica teórica máxima (%)

A = Masa de la muestra seca (g)

D = Masa del picnómetro lleno de agua (g)

E = Masa del picnómetro con la muestra y agua (g)

Porcentaje de vacíos

Procedimiento

1. Determinar la gravedad específica bulk de la mezcla compactada, por medio del procedimiento descrito anteriormente.
2. Determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta, por medio del procedimiento descrito anteriormente.
3. Calcular el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica, por medio de la siguiente expresión:

$$V_A = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} * 100 \quad (10)$$

Donde:

VA = Porcentaje de vacíos

Gmm = Gravedad específica teórica máxima (%)

Gmb = Gravedad específica bruta

Estabilidad-flujo Marshall

Equipo a utilizar:

- Mordazas de hierro fundido. La mordaza inferior va montada sobre una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a ella que sirven de guía para ensamblarla con la mordaza superior.
- Máquina de compresión para la rotura de las probetas. Se emplea una prensa mecánica o hidráulica, capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50 ± 5 mm/min.
- Anillo dinamométrico, para medir la resistencia de la probeta. Irá acoplado a la prensa y debe ser de 20 kN de capacidad nominal con una sensibilidad mínima de 50 N.

- Deformímetro de lectura final fija, con divisiones de 0,25 mm o de mayor precisión. En el momento del ensayo, el medidor deberá estar apoyado firmemente sobre la mordaza inferior.
- Baño de agua de profundidad suficiente para mantener una lámina de agua mínima de 30 mm sobre la superficie superior de las probetas compactadas. Debe tener un control termostático que le permita mantener la temperatura en cualquier punto del tanque.



Figura 61: Anillo dinamométrico,

Procedimiento

1. Colocar las probetas en el baño de agua durante 45 minutos, manteniendo una temperatura constante de 60 °C.
2. Antes de colocar las probetas, limpiar perfectamente las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo.
3. Retirar una probeta del baño de agua y secar cualquier exceso de agua con una toalla. Se coloca centrada en la mordaza inferior, se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa. Colocar el medidor de flujo en posición, se ajusta a cero, y se mantiene su vástago firmemente contra la mordaza superior, mientras se aplica la carga de ensayo.
4. A continuación, aplicar la carga sobre la probeta con la prensa a una rata de deformación constante de 50 ± 5 mm/min hasta que ocurra la falla, es decir, cuando se advierte que se alcanza la máxima carga y luego comienza a decrecer. El procedimiento

completo, desde la extracción de la probeta del baño de agua hasta su falla, no deberá exceder a más de 30 segundos.

5. Anotar el valor de carga leído en el anillo dinamométrico y el valor de la deformación leído en el deformímetro.
6. Se calcula el equivalente de resistencia en libras-fuerza de la lectura obtenida en el anillo dinamométrico, utilizando los valores de la tabla Humboldt Mfg. Co. corrección estabilidad Marshall
7. Al valor de resistencia se le aplica un factor de corrección, el cual está en función del volumen de la probeta ensayada, para esto se utiliza la tabla de factores de corrección de estabilidad medida

8.4.6. Superpave

Rueda de Hamburgo

Determinar la susceptibilidad a la humedad y formación de roderas mediante el equipo de Rueda Cargada de Hamburgo en una mezcla asfáltica en caliente compactada. Así mismo, determinar la falla prematura de la mezcla debido a la debilidad de la estructura del agregado o inadecuada rigidez del asfalto.

Equipo a utilizar

- Máquina de rueda cargada de Hamburgo de accionamiento eléctrico capaz de mover una rueda de acero de 47.0 mm de ancho y 203.2 mm de diámetro, sobre el espécimen de prueba.
- Control de sistema de temperatura
- Sistema de medición de rodera. dispositivo transductor de desplazamiento (LVDT) con un rango de medición entre 0 y 20 mm, capaz de medir la profundidad de la rodera al centro ± 1.27 mm (0.5 in) a lo largo de la trayectoria de la rueda, con una aproximación de 0.15 mm.
- Contador de paso de rueda un solenoide que cuenta la pasada de la rueda sobre el espécimen
- Sistema de montaje de espécimen cilíndrico conformado por dos moldes de polietileno de alta densidad o yeso blanco, para asegurar el espécimen.
- Compactador de amasado lineal hidráulico que utiliza una serie de placas de acero alineadas verticalmente para compactar mezclas asfálticas moldeadas en placas planas y rectangulares de grosor y densidad predeterminados.
- Compactador giratorio electromecánico, electrohidráulico o electroneumático capaz de girar a 30 ± 0.5 rpm y producir un ángulo de giro interno constante de 1.16 ± 0.02 ° durante el proceso de compactación



Figura 62: Máquina de rueda cargada de Hamburgo o Rueda de Hamburgo (ADATEC, 2015)

Procedimiento

1. Preparar 4 especímenes cilíndricos por ensayo de 150 mm de diámetro y con un contenido de vacíos de $7 \pm 0.5\%$. El espesor del espécimen debe ser por lo menos el doble del tamaño nominal del agregado, generalmente produciendo un espécimen de 38 a 100 mm de espesor
2. Para la preparación de los especímenes cilíndricos mezclar y compactar de acuerdo con el Método de prueba para la preparación y compactación de especímenes de mezcla asfáltica en caliente por medio del compactador giratorio
3. Cortar los especímenes de 150 mm de diámetro con una sierra a una distancia aproximada de 16 mm del centro del espécimen al borde exterior. La distancia exacta de corte se deberá verificar con el tamaño de los moldes. La altura debe ser ajustada al sistema de montaje
4. Determinar la gravedad específica bruta del espécimen (G_{mb}), Determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (G_{mm}) y Determinar el contenido de vacíos de la muestra.
5. Ajustar los especímenes dentro de los moldes de polietileno. Colocar los moldes de polietileno en la bandeja. Colocar las bandejas de montaje con los especímenes de prueba en el equipo y ajustar la altura de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.
6. En caso de existir espacio entre el espécimen y el molde de polietileno se podrá utilizar una mezcla de yeso-cemento para rellenar los vacíos. Permitir que fragüe el yeso por lo menos 1 hora.

7. Encender la Rueda Cargada de Hamburgo e iniciar el software utilizado para comunicarse con el equipo.
8. Introducir la información necesaria del proyecto y requisitos de configuración del ensayo.
9. Seleccionar la temperatura de ensayo, profundidad máxima de rodera permitida y número máximo de pasadas de acuerdo con las especificaciones del ensayo.
10. Llenar el baño de agua del equipo de Rueda Cargada de Hamburgo a la temperatura de ensayo seleccionada de acuerdo con las especificaciones del equipo
11. Pre-acondicionar los especímenes de prueba en el baño por 30 minutos después de que el agua haya alcanzado la temperatura de prueba seleccionada. Los especímenes no deben permanecer sumergidos más de 60 ± 5 minutos antes de iniciar el ensayo (incluyendo el tiempo de acondicionamiento).
12. Hacer descender las ruedas sobre los especímenes. Las ruedas no deberán estar en contacto con los especímenes durante más de 5 minutos antes de arrancar la prueba
13. Hay que asegurar que el LVDT pueda medir entre 10 y 18 mm y ajustar si es necesario para obtener esta lectura.
14. Iniciar el ensayo.
15. El equipo se detendrá cuando se hayan efectuado el número de pasadas especificadas o cuando el espécimen haya alcanzado la profundidad de rodera máxima establecida
16. El resultado del ensayo se reportará como el valor promedio de ambos especímenes o de ambos pares de especímenes.
17. Graficar la profundidad de rodera registrada por rueda en función del número de pasadas.
18. Determinar la profundidad máxima de rodera como la deformación máxima obtenida al número de pasadas especificadas en el ensayo
19. Determinar la pendiente de la zona secundaria.

Información a considerar Se realizó una investigación sobre las empresas que contaban con la rueda de Hamburgo y se encontró que actualmente ningún laboratorio en Guatemala cuenta con un equipo completo para un diseño por desempeño (Superpave), lo cual hace complicada la evaluación de este tipo de ensayos en el país. Debido a esto se optó por realizar el ensayo en el extranjero, la opción más cercana está ubicada en El Salvador, por lo tanto, el ensayo de la rueda de Hamburgo se realizó con la empresa Asfalca S.A, ubicada en Armenia, Sonsonate, ellos poseen todo el equipo y conocimiento necesario para realizar el ensayo de la rueda de Hamburgo.

Diseño de mezclas asfálticas

En este capítulo se encuentran los resultados esenciales utilizados para el diseño de la mezcla asfáltica convencional y modificada. Se pueden observar los diseños de la granulometría, para cada tipo de mezcla; la gravedad específica de bulk, gravedad específica teórica máxima, porcentaje de vacíos y la estabilidad-flujo Marshall.

9.1. Granulometría

En esta sección se muestra la granulometría diseñada para los dos tipos de concreto asfáltico, esto es debido a que se utilizó el mismo agregado pétreo para ambas mezclas, ya que, no se busca modificar la estructura mineral de estas.

Cuadro 19: Porcentaje de participación para cada tipo de agregado pétreo

No.	Agregado	Tamaño	% De Participación
1	Grava	3/4" - 1/2"	35
2	Gravilla	1/2" - 3/8"	15
3	Polvo de Roca	3/8" - 0"	50

Cuadro 20: Porcentaje utilizado para cada tamiz y valores establecidos en las especificaciones

Granulometría Práctica D T.M.A. 19 mm. (3/4")		
Malla	% Pasa	Especificación
1"	100.0	100
3/4"	100.0	90 - 100
3/8"	69.0	56 - 80
No. 4	52.3	35 - 65
No. 8	39.6	23 - 49
No. 50	13.5	05 - 19
No. 200	6.0	02 - 08

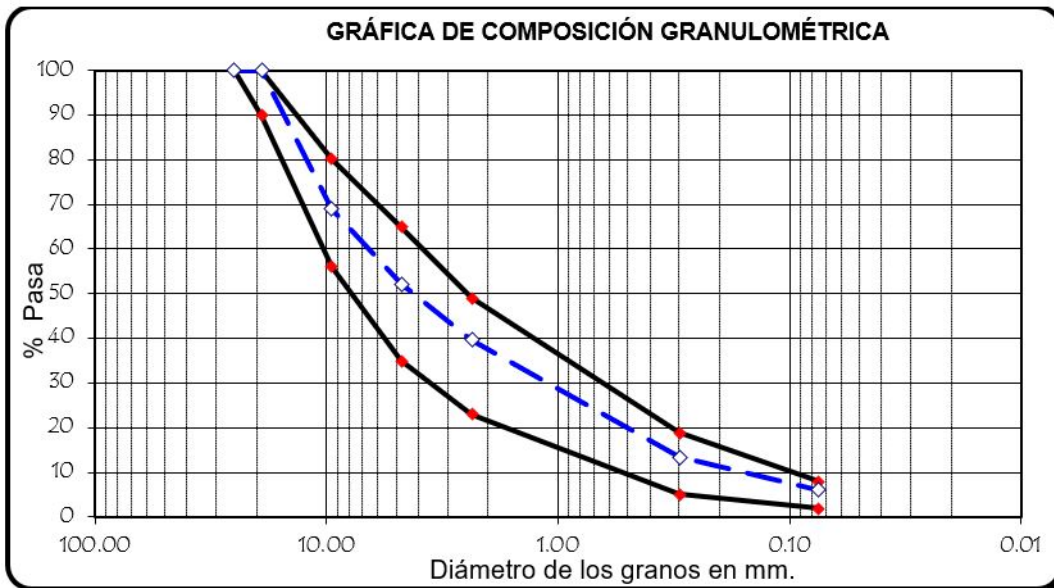


Figura 63: Curva granulométrica utilizada para ambos tipos de diseño de mezcla asfáltica

9.2. Mezcla convencional

En esta sección se encuentran los resultados obtenidos para el diseño del concreto asfáltico convencional o la mezcla patrón, en donde el procedimiento para cada resultado se puede observar en el capítulo anterior.

9.2.1. Gravedad específica Bulk

Cuadro 21: Datos y resultados de la gravedad específica Bulk, mezcla convencional

4,5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1183.4	PESO SECO	1185.4	PESO SECO	1185.6
PESO SECO SATURADO	1185.6	PESO SECO SATURADO	1188	PESO SECO SATURADO	1188.6
PESO SUMERGIDO	668.8	PESO SUMERGIDO	670.2	PESO SUMERGIDO	671
G _{mb}	2.29	G _{mb}	2.29	G _{mb}	2.29
5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1187.2	PESO SECO	1185.8	PESO SECO	1189.4
PESO SECO SATURADO	1193.0	PESO SECO SATURADO	1189.0	PESO SECO SATURADO	1192.0
PESO SUMERGIDO	678.0	PESO SUMERGIDO	674.6	PESO SUMERGIDO	678.0
G _{mb}	2.30	G _{mb}	2,30	G _{mb}	2,31
5,5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1192.6	PESO SECO	1190.8	PESO SECO	1196.2
PESO SECO SATURADO	1193.6	PESO SECO SATURADO	1192.0	PESO SECO SATURADO	1198.2
PESO SUMERGIDO	681.0	PESO SUMERGIDO	681.4	PESO SUMERGIDO	684.2
G _{mb}	2,32	G _{mb}	2,33	G _{mb}	2,32
6% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1204.4	PESO SECO	1190.8	PESO SECO	1196.2
PESO SECO SATURADO	1207.0	PESO SECO SATURADO	1192.0	PESO SECO SATURADO	1198.2
PESO SUMERGIDO	693.8	PESO SUMERGIDO	681.4	PESO SUMERGIDO	684.2
G _{mb}	2,34	G _{mb}	2,33	G _{mb}	2,32
6,5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1205.8	PESO SECO	1204.8	PESO SECO	1202.4
PESO SECO SATURADO	1206.8	PESO SECO SATURADO	1206.0	PESO SECO SATURADO	1204.2
PESO SUMERGIDO	695.0	PESO SUMERGIDO	696.0	PESO SUMERGIDO	693.2
G _{mb}	2.35	G _{mb}	2.36	G _{mb}	2.35

9.2.2. Gravedad específica teórica máxima

Cuadro 22: Datos y resultados de la gravedad específica teórica máxima, mezcla convencional

Probeta 4.5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7056.7	G _{mm}	2.481
MATERIAL	1182.8		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	7762.8		
Probeta 5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7056.7	G _{mm}	2.454
MATERIAL	1185.6		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	7759.2		
Probeta 5.5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7056.7	G _{mm}	2.429
MATERIAL	1188.5		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	7756.0		
Probeta 6 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7056.7	G _{mm}	2.417
MATERIAL	1191.2		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	7755.0		
Probeta 6.5% de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7056.7	G _{mm}	2.389
MATERIAL	1192.1		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	7750.0		

9.2.3. Porcentaje de vacíos

Cuadro 23: Tabla VI. Datos y resultados del porcentaje de vacíos, mezcla convencional

Probeta 4.5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2.481
G _{mb}	2.290
VA (%)	7.71
Probeta 5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2.454
G _{mb}	2.308
VA (%)	5.950
Probeta 5.5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2.429
G _{mb}	2.329
VA (%)	4.15
Probeta 6 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2.417
G _{mb}	2.344
VA (%)	3.00
Probeta 6.5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2.389
G _{mb}	2.353
VA (%)	1.51

9.2.4. Prueba de estabilidad y flujo Marshall

Cuadro 24: Resultados de la prueba de estabilidad y flujo Marshall, mezcla convencional

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	Lectura anillo dinamométrico (delft)	Flujo (0,01")	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección (lbf)	Estabilidad corregida (lbf)
4.50	1	360	13	3472.00	0.995	3455.00
	2	350	13	3376.00	0.990	3376.00
5.00	1	350	13	3342.00	0.990	3342.00
	2	370	14	3544.00	0.993	3544.00
5.50	1	370	14	3569.00	0.998	3562.00
	2	365	13	3521.00	0.998	3514.00
6.00	1	365	14	3521.00	1.00	3521.00
	2	350	12	3376.00	0.993	3352.00
6.50	1	350	13	3420.00	1.013	3420.00
	2	360	13	3500.00	1.008	3500.00

9.2.5. Ensayo de Rueda de Hamburgo

Cuadro 25: Resultados de la mezcla convencional para el ensayo de la Rueda de Hamburgo

GRAVEDAD ESPECIFICA TEÓRICA MÁXIMA DE MEZCLA ASFÁLTICAS EN CALIENTE							
Muestra:	1	2	3	PROMEDIO			
Peso seco de muestra de mezcla suelta al aire:	2,528.3 gr.	2,531.9 gr.	-	-			
Peso de picnómetro calibrado + agua (25°C):	7,639.3 gr.	7,639.3 gr.	-	-			
Peso de picnómetro + agua (25°C) + Muestra:	9,130.8 gr.	9,132.7 gr.	-	-			
Gravedad específica teórica máxima (Gmm):	2.439	2.438	-	2.439			
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS							
Muestra	Diámetro	Altura	Peso seco	Peso SSS	Peso sumer.	Gs BULK	% Vacíos
1	150.0 mm.	61.0 mm.	2,295.8 gr.	2,323.3 gr.	1,305.9 gr.	2.257	7.5%
2	150.0 mm.	61.0 mm.	2,304.8 gr.	2,328.3 gr.	1,308.9 gr.	2.261	7.3%
3	150.0 mm.	61.0 mm.	2,303.8 gr.	2,327.8 gr.	1,306.9 gr.	2.257	7.5%
4	150.0 mm.	61.0 mm.	2,304.9 gr.	2,328.8 gr.	1,308.0 gr.	2.258	7.4%
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LA RUEDA DE HAMBURGO							
Muestra	Temperatura	Δ - 20,000	Ciclos - Δmax	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
1	51.9°C	-18.4 mm.	20,000	-0.0275%	-6.6 mm.	14,872	-0.1250%
2							
3	51.9°C	-21.1 mm.	20,000	-0.0485%	-7.0 mm.	9,637	-0.1450%
4							

(Asfalca, 2020)

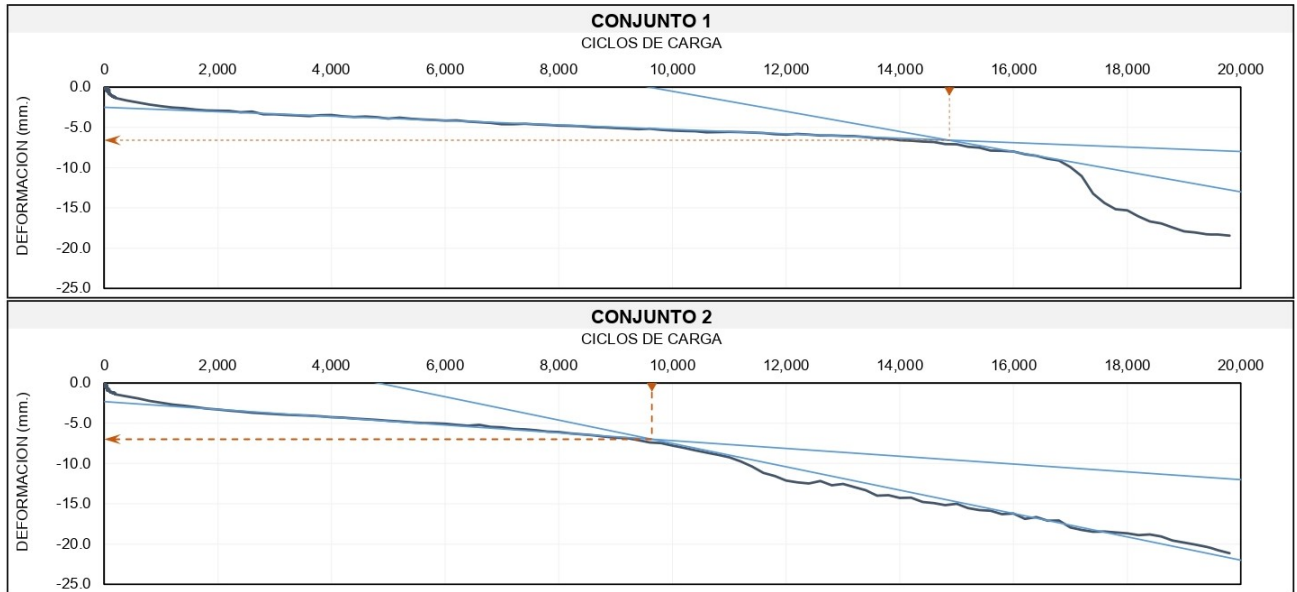


Figura 64: Resultados de la mezcla convencional para el ensayo de la Rueda de Hamburgo (Asfalca, 2020)

9.3. Mezcla modificada con caucho

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para el diseño del concreto asfáltico modificado con caucho, en donde el procedimiento para cada resultado se puede encontrar en el capítulo anterior.

9.3.1. Gravedad específica Bulk

Cuadro 26: Datos y resultados de la gravedad específica Bulk, mezcla modificada

4,5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1169.2	PESO SECO	1170.8	PESO SECO	1167.2
PESO SECO SATURADO	1174.0	PESO SECO SATURADO	1176.2	PESO SECO SATURADO	1175.6
PESO SUMERGIDO	659.4	PESO SUMERGIDO	657.4	PESO SUMERGIDO	657.4
G _{mb}	2.27	G _{mb}	2.25	G _{mb}	2.25
5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1179.6	PESO SECO	1177.6	PESO SECO	1170.6
PESO SECO SATURADO	1184.2	PESO SECO SATURADO	1184.0	PESO SECO SATURADO	1177.2
PESO SUMERGIDO	666.2	PESO SUMERGIDO	664.0	PESO SUMERGIDO	660.2
G _{mb}	2.27	G _{mb}	2.26	G _{mb}	2.26
5,5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1177.4	PESO SECO	1178.2	PESO SECO	1173.0
PESO SECO SATURADO	1184.0	PESO SECO SATURADO	1184.2	PESO SECO SATURADO	1178.2
PESO SUMERGIDO	668.0	PESO SUMERGIDO	669.2	PESO SUMERGIDO	664.2
G _{mb}	2,28	G _{mb}	2.28	G _{mb}	2.28
6% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1178.8	PESO SECO	1174.6	PESO SECO	1173.8
PESO SECO SATURADO	1183.2	PESO SECO SATURADO	1179.2	PESO SECO SATURADO	1178.2
PESO SUMERGIDO	668.6	PESO SUMERGIDO	666.6	PESO SUMERGIDO	665.6
G _{mb}	2.29	G _{mb}	2.29	G _{mb}	2.29
6,5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1181.2	PESO SECO	1181.6	PESO SECO	1181.6
PESO SECO SATURADO	1188.8	PESO SECO SATURADO	1187.0	PESO SECO SATURADO	1187.0
PESO SUMERGIDO	677.8	PESO SUMERGIDO	677.4	PESO SUMERGIDO	676.0
G _{mb}	2.31	G _{mb}	2.31	G _{mb}	2.31

9.3.2. Gravedad específica teórica máxima

Cuadro 27: Datos y resultados de la gravedad específica teórica máxima, mezcla modificada

Probeta 4.5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7056.0	G _{mm}	2.467
MATERIAL	1157.0		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	7744.0		
Probeta 5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7056.0	G _{mm}	2.421
MATERIAL	1172.0		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	7744.0		
Probeta 5.5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7056.0	G _{mm}	2.415
MATERIAL	1164.0		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	7738.0		
Probeta 6 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7056.0	G _{mm}	2.387
MATERIAL	1172.0		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	7737.0		
Probeta 6.5% de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7056.0	G _{mm}	2.378
MATERIAL	1170.0		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	7734.0		

9.3.3. Porcentaje de vacíos

Cuadro 28: Tabla VII. Datos y resultados del porcentaje de vacíos, mezcla modificada

Probeta 4.5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2.467
G _{mb}	2.260
VA (%)	8.37
Probeta 5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2.421
G _{mb}	2.269
VA (%)	6.31
Probeta 5.5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2.415
G _{mb}	2.284
VA (%)	5.43
Probeta 6 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2.387
G _{mb}	2.291
VA (%)	4.02
Probeta 6.5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2.378
G _{mb}	2.310
VA (%)	2.86

9.3.4. Prueba de estabilidad y flujo Marshall

Cuadro 29: Resultados de la prueba de estabilidad y flujo Marshall, mezcla modificada

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	Lectura anillo dinamométrico (delft)	Flujo (0,01")	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección (lbf)	Estabilidad corregida (lbf)
4.50	1	355	13	3424.00	0.988	3383.00
	2	345	13	3329.00	0.988	3288.00
5.00	1	345	13	3328.00	0.990	3294.00
	2	330	12	3183.00	0.990	3151.00
5.50	1	320	12	3086.00	0.995	3071.00
	2	330	13	3183.00	0.995	3167.00
6.00	1	315	12	3038.00	0.995	3023.00
	2	325	12	3135.00	0.998	3128.00
6.50	1	310	12	2990.00	1.003	2999.00
	2	315	12	3038.00	0.995	3023.00

9.3.5. Ensayo de Rueda de Hamburgo

Cuadro 30: Resultados de la mezcla modificado para el ensayo de la Rueda de Hamburgo

GRAVEDAD ESPECIFICA TEÓRICA MÁXIMA DE MEZCLA ASFÁLTICAS EN CALIENTE							
Muestra:	1	2	3	PROMEDIO			
Peso seco de muestra de mezcla suelta al aire:	2,512.9 gr.	2,519.3 gr.	-	-			
Peso de picnómetro calibrado + agua (25°C):	7,639.3 gr.	7,639.3 gr.	-	-			
Peso de picnómetro + agua (25°C) + Muestra:	9,124.5 gr.	9,127.7 gr.	-	-			
Gravedad específica teórica máxima (Gmm):	2.445	2.444	-	2.445			
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS							
Muestra	Diámetro	Altura	Peso seco	Peso SSS	Peso sumer.	Gs BULK	% Vacíos
1	150.0 mm.	61.0 mm.	2,272.3 gr.	2,282.4 gr.	1,280.9 gr.	2.269	7.2%
2	150.0 mm.	61.0 mm.	2,273.3 gr.	2,287.2 gr.	1,285.4 gr.	2.269	7.2%
3	150.0 mm.	61.0 mm.	2,309.4 gr.	2,320.0 gr.	1,305.2 gr.	2.276	6.9%
4	150.0 mm.	61.0 mm.	2,312.3 gr.	2,325.4 gr.	1,308.2 gr.	2.273	7.0%
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LA RUEDA DE HAMBURGO							
Muestra	Temperatura	Δ - 20,000	Ciclos - Δmax	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
1	50.0°C	-18.7 mm.	20,000	-0.0375%	-8.2 mm.	15,306	-0.2825%
2							
3	50.0°C	-20.7 mm.	20,000	-0.0250%	-5.6 mm.	14,462	-0.3500%
4							

(Asfalca, 2020)

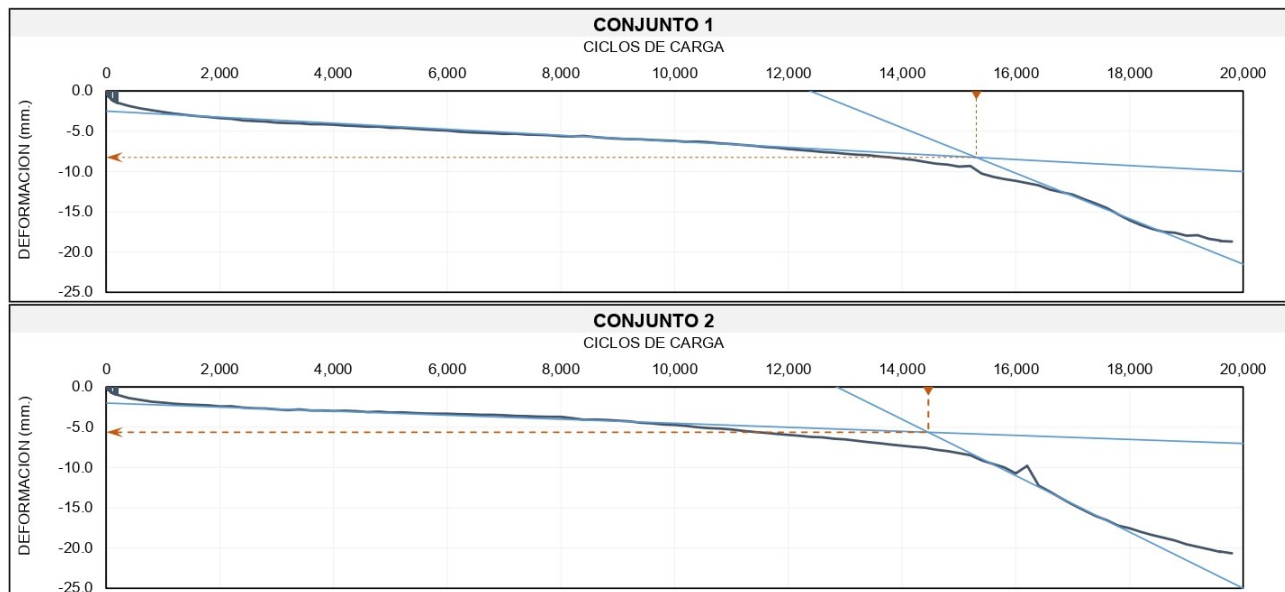


Figura 65: Resultados de la mezcla modificado para el ensayo de la Rueda de Hamburgo (Asfalca, 2020)

Análisis y comparación de resultados

En este capítulo se muestra un resumen de resultados en el cual se comparan los resultados obtenidos de los ensayos elaborados tanto para el cemento asfáltico como para el concreto asfáltico convencional y modificado. Asimismo, se compran estos resultados con lo establecido en las especificaciones.

10.1. Cemento asfáltico

En esta sección se muestran los resultados obtenido para el cemento asfáltico modificado con PET y las comparaciones entre el cemento asfáltico convencional y modificado con caucho triturado.

10.1.1. Modificado con PET

Como se muestra en las Figuras 66 y 67 se puede observar que luego de 2 hora de mezclado a una temperatura de 185°C el PET no logró mezclarse o unirse con el asfalto, esto puede ser debido a que el tereftalato de polietileno no es compatible con el AC30 utilizado, ya sea, por la polaridad de los materiales o por la diferencia entre densidades de los mismos, ya que, la gravedad específica del AC30 utilizado es de 1.064 y según Sánchez *et al.* (2018); la gravedad específica del PET es de 1.37, el cual genera una reacción de sedimentación en el polímero PET. Además, el asentamiento del PET en el fondo del recipiente se dio debido a que, según Sánchez *et al.* (2018) la temperatura de fusión del PET es de 249°C y en el proceso de mezclado solo se llegó a 185°C, ya que durante el tiempo de mezclado el PET siempre estuvo en estado sólido y no se logró obtener el resultado esperado. Sin embargo, esta situación se puede corregir colocando un promotor adherente diseñado específicamente para este tipo de polímeros y poder garantizar la adherencia entre el asfalto y el Tereftalato de polietileno, ya que, la polaridad entre estos materiales es diferente.



Figura 66: Resultado de la modificación del cemento asfáltico con tereftalato de polietileno



Figura 67: Sedimentación del PET en el cemento asfáltico

10.1.2. Comparación

Cuadro 31: Cuadro comparativo de las características generales del asfalto AC-30 estándar y modificado

Ensayo	AC30	
	Estándar	Modificado
Penetración (0.1 mm)	69	53
Punto de ablandamiento (°C)	44	49
Recuperación por torsión elástica	6%	11%

Como se observa en el Cuadro 31 las características entre el cemento asfáltico AC30 convencional y modificado, presenta cambios significativos. En el ensayo de penetración se puede observar que hay una reducción de la distancia medida, por lo tanto, el cemento asfáltico modificado obtuvo un aumento en su rigidez; por lo que se traduce como una elevación en su dureza. Este resultante en el aumento de la penetración ayuda a que el cemento asfáltico sea menos susceptible a las deformaciones, sin embargo, debido a este aumento, el AC30 posee un mayor riesgo a la fatiga.

El valor del punto de ablandamiento tuvo una variación de 5°C entre ambos tipos de cemento asfáltico, este aumento es beneficioso para el AC30 modificado debido a que la temperatura a la cual fluirá durante su periodo de servicio será mayor. Esto es importante debido a que el asfalto es un material visco-elástico, por lo cual, para el asfalto modificado; la temperatura en la cual el material se vuelve más blando y menos viscoso, será mayor. Esto es esencial debido a que luego de alcanzar esa temperatura en punto de ablandamiento, el asfalto por pequeños cambios térmicos podría presentar grandes deformaciones.

El ensayo de recuperación por torsión elástica tiene como objetivo obtener resultados de los asfaltos modificados, sin embargo, en este ensayo se realizó el estudio del asfalto sin modificar para tener un parámetro de comparación y observar si es posible obtener una mejora en el asfalto. En el Cuadro 31 se muestra que desde el cemento asfáltico estándar al modificado hubo un cambio del 5% recuperación por lo que representa en el asfalto modificado una mejor recuperación elástica y, por lo tanto, esta tiende a presentar menos deformaciones, ya que tiene un 5% más de capacidad de recuperación en contraparte al estándar. Esto quiere decir que, al aplicar una carga sobre el asfalto sin modificar, este presentará mayores deformaciones a las que pueda presentar asfalto modificado en su periodo de servicio.

10.2. Concreto asfáltico

En esta sección se muestran los resultados y sus comparaciones para el concreto asfáltico convencional y modificado con caucho triturado.

10.2.1. Gravedad específica bruta Bulk

Cuadro 32: Cuadro comparativo de gravedad específica Bulk

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional G_{mb}	Mezcla asfáltica modificada G_{mb}
4.50	2.290	2.260
5.00	2.308	2.269
5.50	2.329	2.284
6.00	2.344	2.291
6.50	2.357	2.314

La variación que presentan los dos diseños de mezclas en la gravedad específica *Bulk* es debido a la incorporación de caucho como aditivo en el cemento asfáltico (AC-30) en la mezcla modificada. Al momento en que se coloca un material de menor densidad, este genera una disminución de la densidad relativa de la mezcla convencional

10.2.2. Gravedad específica teórica máxima

Cuadro 33: Cuadro comparativo de gravedad específica teórica máxima

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional G_{mm}	Mezcla asfáltica modificada G_{mm}
4.50	2.481	2.467
5.00	2.454	2.421
5.50	2.429	2.415
6.00	2.417	2.387
6.50	2.404	2.382

Al igual que en la gravedad específica *Bulk*, en la teórica máxima la mezcla modificada baja su valor debido a que en la mezcla modificada hay un pequeño aumento en el volumen a causa del caucho incorporado en el cemento asfáltico (AC -30), sin embargo, la diferencia entre la gravedad específica de la mezcla convencional y la modificada es mínima (casi igual), ya que, aquí solo se está tomando en cuenta el volumen y la masa del agregado, del cemento asfáltico y del caucho por lo cual no incluye los vacíos de aire que generan una mayor diferencia en la gravedad específica de *Bulk*. Asimismo, esta disminución se genera por la colocación de un material de menor densidad en la mezcla convencional, el caucho es el material utilizado en este caso.

10.2.3. Vacíos de aire o porcentaje de vacíos

Cuadro 34: Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional VA (%)	Mezcla asfáltica modificada VA (%)
4.50	7.71	8.37
5.00	5.95	6.31
5.50	4.15	5.43
6.00	3.00	4.02
6.50	1.96	2.86

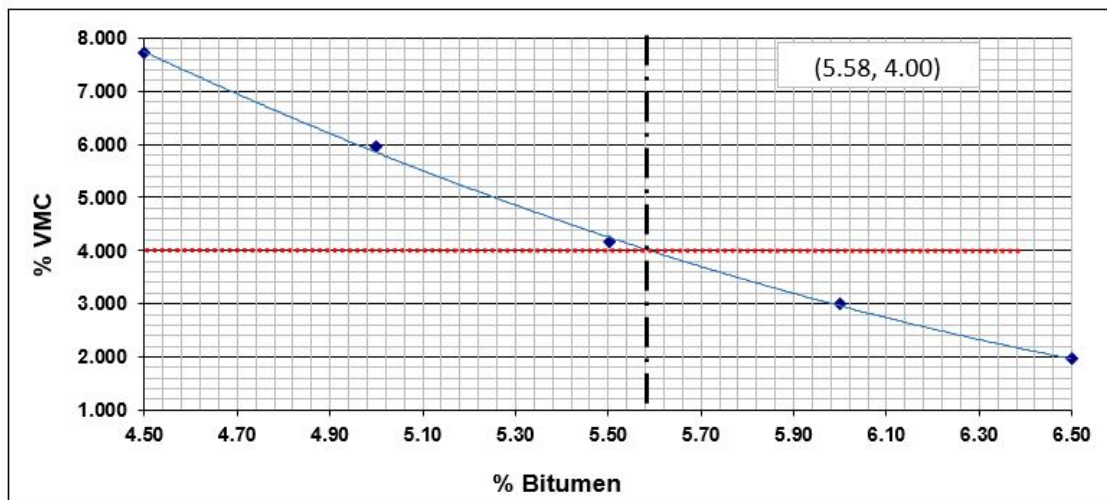


Figura 68: Gráfico % vacíos en la mezcla compactada (VMC) - % bitumen (mezcla convencional)

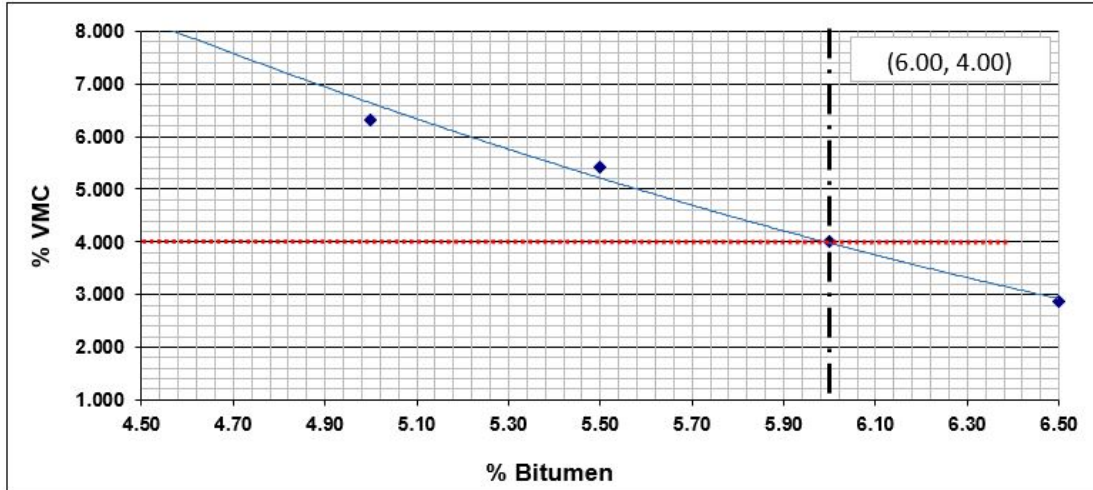


Figura 69: Gráfico % vacíos en la mezcla compactada (VMC) - % bitumen (mezcla modificada con caucho)

El contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla convencional se encuentra en un valor de 5.58 %, mientras que en la mezcla modificada en un 6.00 %, esto se determinó por medio del porcentaje de vacíos. En ambas mezclas asfálticas se utilizó un porcentaje de vacíos del 4 % para lograr estar dentro de los límites de porcentaje de vacíos que indica el libro azul en la sección 401, en donde se indican los límites del 3 al 5 %, por lo cual, se utilizó el promedio de estos valores limite.

Lo que se puede observar en las Figuras 68 y 69, la mezcla modificada con caucho eleva el contenido óptimo de asfalto, esto es debido a que es más fácil recubrir el agregado con el asfalto sin modificar, puesto que este no tiene el polímero. En cambio, cuando el polímero está integrado a la matriz del asfalto modificado, se crean enlaces entre el asfalto y el agregado por lo cual se necesita más asfalto. Debido que el asfalto es el aglutinante al tener polímero o al ser modificado con el GCR, se necesite una mayor cantidad de asfalto para cubrir la película de las partículas de agregado y cubrir la misma cantidad a la de una mezcla convencional, por lo cual, genera un aumento de 0.42 % en el contenido óptimo de la mezcla asfáltica modificada.

10.2.4. Estabilidad Marshall

Cuadro 35: Cuadro comparativo de estabilidad Marshall

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional estabilidad (lbf)	Mezcla asfáltica modificada (lbf)
4.50	3393.00	3237.00
5.00	3425.00	3186.00
5.50	3516.00	3101.00
6.00	3452.00	2967.00
6.50	3461.00	3002.00

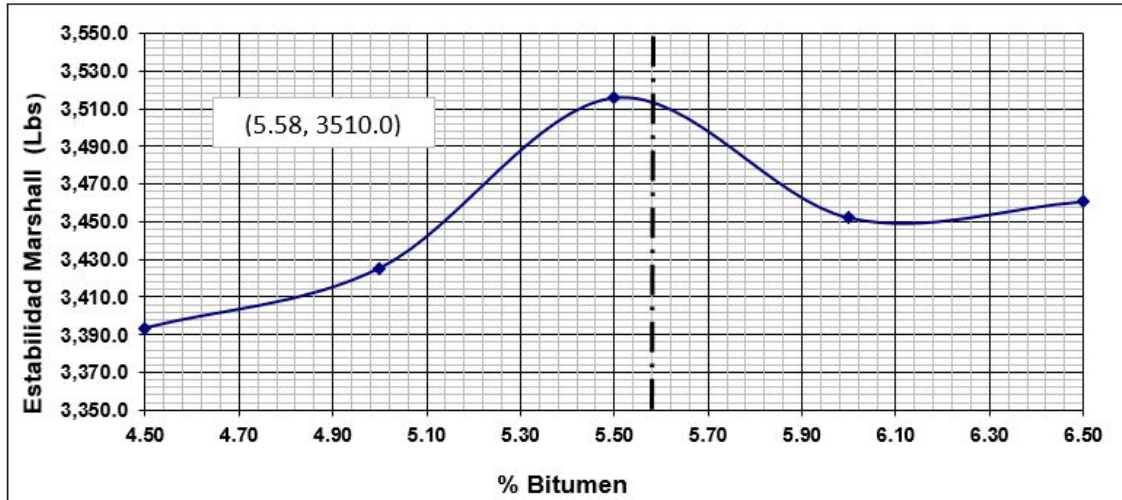


Figura 70: Gráfico de estabilidad Marshall (Diseño convencional)

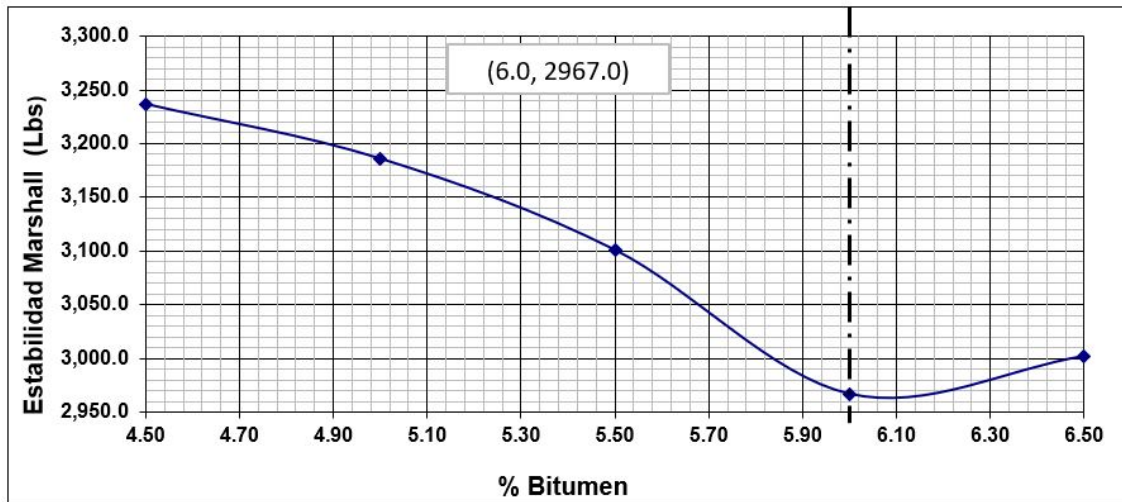


Figura 71: Gráfico de estabilidad Marshall (Mezcla modificada)

Basado en el valor mínimo de estabilidad Marshall (1200 lbf) en una mezcla compactada, ambas mezclas cumplen con las especificaciones. La máxima estabilidad encontrada en la mezcla convencional fue de 3516 lbf, el cual, es el valor más próximo para un contenido de asfalto del 5.58 %. Para el concreto asfáltico modificado el valor máximo de estabilidad fue de 3237 lbf, sin embargo, este valor es descartado, ya que, este se obtuvo para un contenido de asfalto de 4.50 %.

El valor de la estabilidad para el contenido óptimo de asfalto modificado con un 6 % fue de 2967 lbf, por lo tanto, hay una diferencia significativa debido a que ocurre una disminución en la capacidad del concreto asfáltico de un 15.47 % (543 lbf) al colocarle el caucho como modificador. A pesar de que hay una disminución en su resistencia, el concreto asfáltico sigue cumpliendo con lo especificado en la sección 401 del libro azul, ya que, los 2967 lbf son mayores a los 1200 lbf requeridos

10.2.5. Flujo Marshall

Cuadro 36: Cuadro comparativo de flujo Marshall

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional (0,001")	Mezcla asfáltica modificada (0,001")
4.50	13.00	12.70
5.00	13.00	12.30
5.50	13.30	12.30
6.00	13.00	11.70
6.50	13.00	12.00

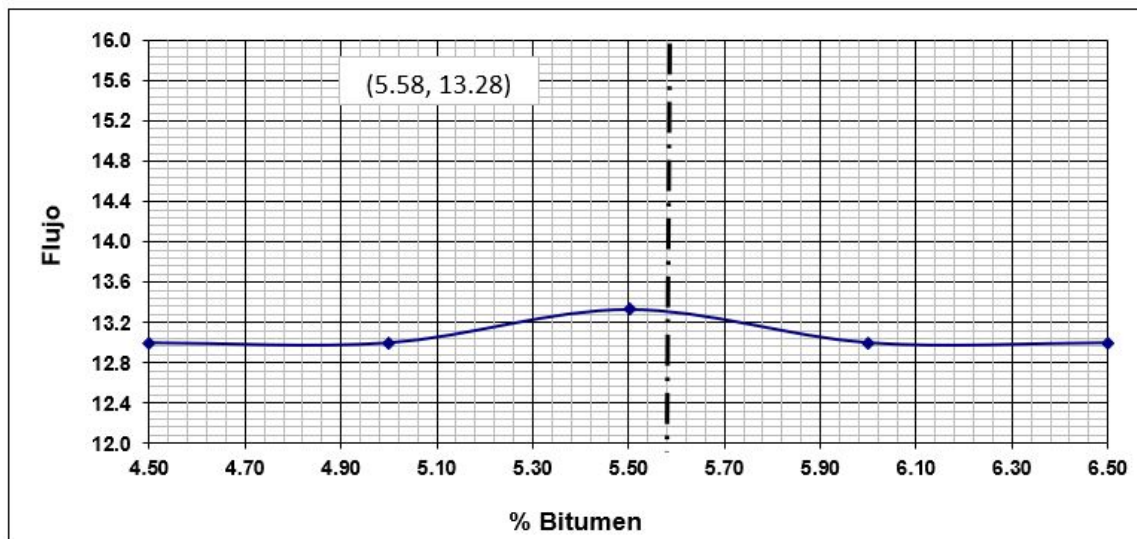


Figura 72: Gráfico de flujo Marshall (Diseño convencional)

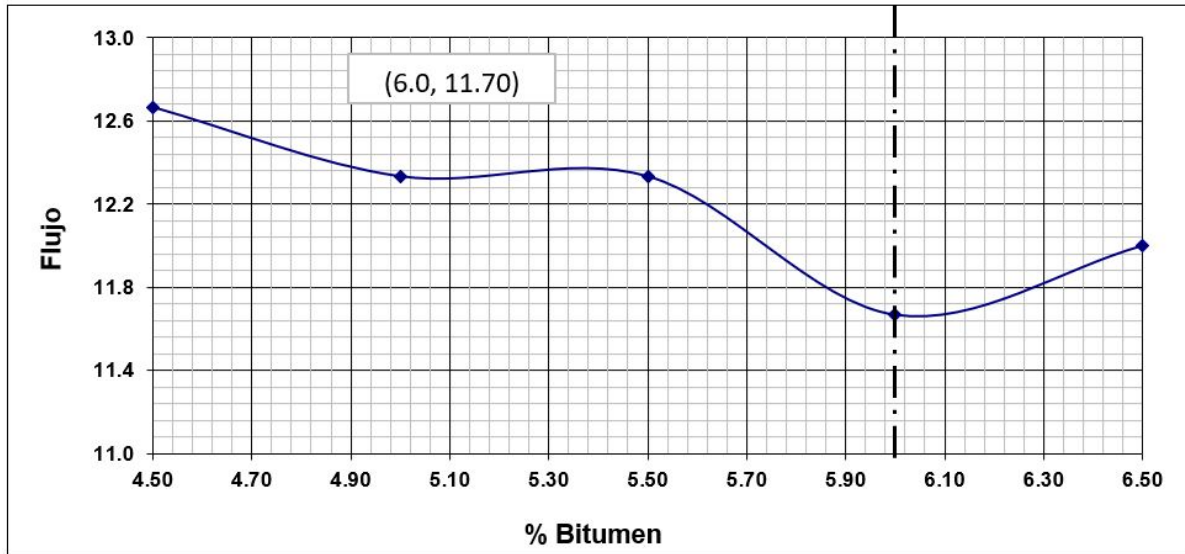


Figura 73: Gráfico de flujo Marshall (Mezcla modificada con caucho)

Los valores de fluencia Marshall de ambas mezclas se encuentran dentro de los parámetros establecidos. La máxima fluencia encontrada en la mezcla convencional fue de 13.30 que es el valor más próximo para un contenido de asfalto del 5.58 %. Para el concreto asfáltico modificado el valor máximo de fluencia fue de 12.70, este valor es descartado; ya que, este se obtuvo para un contenido de asfalto de 4.50 %. El valor de fluencia mínimo obtenido es para el contenido óptimo de asfalto modificado (6 %) con un valor de 11.7, por lo cual, hay una reducción significativa en la deformación de la mezcla asfáltica; de modo que hubo una mejora del 11.9 % en la deformación del concreto asfáltico modificado. Además, según Asphalt Institute (2014) los valores de flujo aumentan cuando se aumenta el contenido de asfalto, en nuestro caso ocurrió lo contrario; ya que se obtuvo una reducción en los valores de fluencia para el concreto asfáltico modificado con relación al convencional. Esto ocurrió debido a que el caucho provocó una mejora en la capacidad de deformación de la mezcla asfáltica convencional.

Cuadro 37: Resultados del ensayo de deformación permanente en la Rueda de Hamburgo mezcla convencional

Muestra	Temperatura	Δ - 20,000	Ciclos - Δ max	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
1	51.9°C	-18.4 mm.	20,000	-0.0275%	-6.6 mm.	14,872	-0.1250%
2							
3	51.9°C	-21.1 mm.	20,000	-0.0485%	-7.0 mm.	9,637	-0.1450%
4							

(Asfalca, 2020)

La mezcla asfáltica convencional presenta el desgranamiento para las muestras 1 y 2 a los 14,872 ciclos con una deformación de 6.6 mm. Las muestras 3 y 4 a los 9,637 ciclos con una deformación de 7 mm, por lo tanto, para la mezcla convencional se utilizará el valor promedio el cual es de 12,255 ciclos con una deformación de 6.8 mm. Asimismo, el valor promedio de la deformación máxima a los 20,000 ciclos es de 19.75 mm, la pendiente del creep es de 0.038 % y la pendiente de desgranamiento (Strip Slope) es de 0.135 %. Se

determinan los valores promedio para poder realizar una mejor comparación con la mezcla asfáltica modificada.

Cuadro 38: Resultados del ensayo de deformación permanente en la Rueda de Hamburgo mezcla modificada

Muestra	Temperatura	Δ - 20,000	Ciclos - Δ max	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
1	50.0°C	-18.7 mm.	20,000	-0.0375%	-8.2 mm.	15,306	-0.2825%
2							
3	50.0°C	-20.7 mm.	20,000	-0.0250%	-5.6 mm.	14,462	-0.3500%
4							

(Asfalca, 2020)

La mezcla asfáltica modificada presenta el desgranamiento para las muestras 1 y 2 a los 15,306 ciclos con una deformación de 8.2 mm. Las muestras 3 y 4 a los 14,462 ciclos con una deformación de 5.6 mm, por lo tanto, para la mezcla modificada se utilizará el valor promedio el cual es de 14,884 ciclos con una deformación de 6.9 mm. Asimismo, el valor promedio de la deformación máxima a los 20,000 ciclos es de 19.7 mm, la pendiente del creep es de 0.03125 % y la pendiente de desgranamiento (Strip Slope) es de 0.316 %. Se determinan los valores promedio para poder realizar una mejor comparación con la mezcla asfáltica convencional.

10.3. Discusión general

Cuadro 39: Resultados por cada tipo de concreto asfáltico.

Mezcla asfáltica	Porcentaje optimo de cemento asfáltico	Gravedad específica Bulk	Gravedad específica teórica máxima	Porcentaje de vacíos	Estabilidad Marshall (lbf)	Flujo Marshall (0,001")	Relación Estabilidad-Flujo (lbf/0,001")	Cambio en porcentaje de Relación Estabilidad-Flujo
Convencional	5.58	2.331	2.427	4	3510	13.28	264.31	4.05%
Modificada	6	2.291	2.387	4	2967	11.7	253.59	

La gravedad específica *Bulk* y teórica máxima de la mezcla asfáltica modificada tuvo una ligera reducción en sus valores en relación con la mezcla asfáltica convencional, así como se puede observar en el Cuadro 39, esto es debido principalmente a que el caucho tiene una menor densidad a la del cemento asfáltico (AC30); por lo que al ser mezclado con el asfalto, provoca una disminución de los valores del concreto asfáltico convencional; dando como resultado los parámetros de la mezcla asfáltica modificada. Además, la variación en las densidades; se puede comprobar que el caucho es el causante de la reducción de estos valores; ya que ambas mezclas asfálticas fueron realizadas con el mismo diseño granulométrico y con los mismos agregados pétreos, la única diferencia fue la incorporación del GCR.

Estos cambios en las densidades del cemento asfáltico modificado generaron un aumento en el porcentaje de vacíos en las probetas ensayadas para el concreto asfáltico modificado, por lo cual si lo comparamos con el concreto asfáltico convencional; este posee menos vacíos,

como se puede observar en el Cuadro 34. Asimismo, el porcentaje de vacíos para la mezcla asfáltica convencional muestra que esta mezcla es un poco más cerrada en comparación a la modificada, ya que la mezcla modificada presenta porcentajes de vacíos un poco más elevados.

Como se observa en el Cuadro 34 las probetas con un 4.50 y 5 % para la mezcla modificada y para la mezcla convencional; la probeta con un 4.50 % muestra que son mezclas abiertas, ya que estas poseen un porcentaje de vacíos mayor al 6 %; por lo tanto, todas las demás probetas que están por debajo del 6 % se consideran como mezclas cerradas. Sin embargo, para todos los análisis tanto para el concreto asfáltico modificado como el convencional, se utilizó un porcentaje de vacíos del 4 % para así cumplir con los parámetros establecidos (3 % y 5 %) en la sección 401 de las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes.

Además, según Asphalt Institute (2014) 4 % es el valor óptimo a emplear como porcentaje de vacíos en el diseño de una mezcla asfáltica; ya sea modificada o no. En otras palabras, debido a que las mezclas que poseen el porcentaje óptimo de asfalto tienen un 4 % de vacíos; el cual es una proporción pequeña, las mezclas asfálticas se vuelve casi impermeables, por lo cual al momento de colocarlo en tramo carretero; estas tendrán la capacidad de proteger las capas inferiores de la estructura del pavimento contra la filtración de agua.

Las probetas ensayadas para determinar el porcentaje de vacíos y así determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico para la mezcla asfáltica modificada. En el Cuadro 34 se puede observar que, para la mezcla modificada, solo la probeta con un porcentaje de cemento asfáltico con un 6 % cumple con los requisitos de vacíos; en cambio las probetas con 5.50 % y 6 % de la mezcla convencional, cumplen con lo requerido por el libro azul. Debido a esto, los porcentajes óptimos se encuentran dentro de los rangos mencionados; por lo cual el porcentaje óptimo para la mezcla convencional es de 5.58 % y el de la modificada es de 6 %, por lo tanto, hay una pequeña variación del 0.42 %. Este cambio en el contenido óptimo es a causa de colocar el caucho en el cemento asfáltico; ya que esto genera enlaces entre el agregado y el asfalto, por lo cual es más difícil cubrir las partículas de los agregados en comparación con el asfalto sin modificar.

Asimismo, en las Figuras 68 y 69 se puede observar que en los rangos del 3 al 5 % de vacíos para la mezcla convencional; se requiere de un menor porcentaje de asfalto en comparación con la mezcla modificada realizando el análisis en los mismos rangos. Además, debido a que la gráfica de ambas mezclas asfálticas posee una pendiente negativa; esto quiere decir que conforme aumenta el porcentaje de bitumen, se reduce el porcentaje de vacíos en la mezcla; en otras palabras, estos valores son inversamente proporcionales, ya que al aumentar el porcentaje de bitumen; se reduce el porcentaje de vacíos y viceversa. Esto ocurre debido a que entre más asfalto se coloque en la mezcla, menos vacíos habrá dentro de ella debido a que el asfalto llena esos espacios vacíos que probablemente puedan quedar atrapado en la mezcla, esta característica ocurre sin importar si el cemento asfáltico sea modificado o no.

En el diseño de las mezclas asfálticas por el método Marshall, se es necesario cumplir con límites establecidos para garantizar ciertas características en las mezclas asfálticas. Según la sección 401 de las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes; la estabilidad Marshall tiene un valor mínimo de 1200 lbf, como se puede observar en el Cuadro 35, tanto la mezcla asfáltica convencional y la modificada con GCR cumplen con

este requisito; ya que todas las probetas con diferentes porcentajes de asfalto poseen una estabilidad mayor a lo requerido, esto se cumple con la mezcla modificada a pesar de que hay una disminución significativa en sus valores de estabilidad.

En el Cuadro 39 se pueden observar los valores de estabilidad Marshall para los porcentajes óptimos de asfalto tanto para la mezcla convencional como la modificada. En este cuadro se puede notar que hay una reducción en el valor de estabilidad de un 15.47% en la mezcla modificada en relación con la mezcla convencional. Esta reducción se puede interpretar negativamente; ya que la mezcla modificada resiste menos carga que la mezcla convencional, sin embargo, esta disminución en la capacidad de carga nos indica los valores positivos obtenidos en la modificación del asfalto.

La mezcla asfáltica modificada al tener una menor capacidad de carga, ya que pasa de una estabilidad Marshall de 3510 lbf de la mezcla convencional a 2967 lbf. La mezcla asfáltica modificada está dispuesta o es susceptible a fallar por medio de una carga estática según la metodología Marshall. El problema de esto es que el ensayo Marshall considera que la mezcla modificada se está deformando a cierto nivel y que esta no regresará a su estado/forma original, por lo tanto, el método lo interpreta como una mezcla más deformable sin recuperación elástica, esto no es así, ya que, aunque realmente esté sobre ella una carga estática en campo; al momento de quitar la carga este se va a recuperar, qué es lo que mide el flujo, esto no quiere decir que la mezcla modificada tendrá una menor resistencia ante la carga estática sino que tendrá una mayor deformación al principio por ser una mezcla menos rígida, sin embargo, ésta se vuelve más elástica (mayor capacidad de recuperación) por los resultados obtenidos en el flujo.

La fluencia Marshall es un valor que debe de cumplir con límites máximos y mínimos que se encuentran establecidos en la sección 401 de las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes. Para esta situación, se tomará el caso más crítico cuando el tránsito vehicular es mayor a 10 elevado a la 6 ESAL; por lo cual el límite mínimo es de 8 y el máximo es de 14. Como se puede observar en el Cuadro 36, todas las probetas con los diferentes porcentajes de asfalto tanto para la mezcla convencional y la modificada cumplen con los límites especificados.

En el Cuadro 39, se muestran los valores de fluencia Marshall para los porcentajes óptimos del cemento asfáltico tanto para mezcla convencional y modificada. En este cuadro se puede notar que hay una variación en los valores de flujo Marshall; en el cual hay una reducción de la fluencia de la mezcla modificada con GCR del 11.9% con relación a la mezcla convencional. Esta reducción es provocada por las características fisicoquímicas que le brindó el caucho al cemento asfáltico.

Al comparar los valores de fluencia de la mezcla modificada con la convencional, la mayor ganancia se obtuvo en el flujo Marshall modificado; ya que la mezcla asfáltica modificada presentó un valor de 11.70 que es menor a los 13.28 de la mezcla convencional. Este valor es importante porque muestra la recuperación de la mezcla después de que haya ocurrido una falla, asimismo da indicios de la deformación permanente; por lo cual con los valores obtenidos en la mezcla asfáltica modificada se sabe que esta va a ser más elástica y se va a comportar de mejor manera ante el ahuellamiento, por lo cual a va a tener una mejor recuperación antes las cargas. Esta característica se va a poder notar de una mejor manera con los resultados de la rueda de Hamburgo.

El mayor beneficio al comparar la estabilidad y la fluencia Marshall está en el flujo, ya que a pesar de que la mezcla modificada resiste menos ante las cargas estáticas; esta posee una mejor recuperación ante las mismas. Por lo tanto, al analizar esta información es necesario tomar en cuenta tanto la fluencia como la estabilidad y saber interpretar la información; ya que si solo se analiza la estabilidad, se podría interpretar que la mezcla modificada no obtuvo ninguna mejora o incremento en sus capacidades; sin embargo, al observar los resultados de la fluencia se puede confirmar que en la elasticidad de la mezcla asfáltica modificada se obtuvo una gran mejora.

Es importante analizar tanto la estabilidad como el flujo en el diseño de una mezcla asfáltica, ya sea que esta esté modificada o no. Por lo tanto, un parámetro que es esencial a tomar en cuenta; es la relación Estabilidad-fluencia. En el Cuadro 39 se encuentran los valores de la relación estabilidad-flujo para la mezcla convencional y modificada. En estos valores se puede observar que se obtuvo un resultado menor para la mezcla asfáltica modificada con un valor de 253.59 y el valor más alto; los tuvo la mezcla convencional con una relación de 264.31.

La diferencia de la relación estabilidad-flujo entre la mezcla convencional y la modificada es de 10.72; el cual representa un 4.05%. Aunque el cambio en la relación no fue muy grande entre ambas mezclas asfálticas, se busca que en una mezcla asfáltica al momento de incorporar un polímero que no está especializado para asfaltos; es decir, al utilizar un material reciclado como lo es el grano de caucho; se busca el poder obtener resultados positivos en la mezcla asfáltica y no perjudicarla al momento de incluir a la mezcla asfáltica.

Tanto la mezcla convencional como la modificada, cumplen con lo establecido en la sección 401 de las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes, el cual da un valor mínimo de 120 y un máximo de 275. La reducción que tuvo la mezcla asfáltica modificada quiere decir que hay una disminución en la rigidez de la mezcla asfáltica; por consiguiente, esta es un poco menos frágil y por ello esta no va a presentar una fisuración temprana. Teniendo en cuenta esa reducción en la relación estabilidad-flujo en la mezcla asfáltica, esta se volvió un poco más elástica; por lo cual la mezcla modificada con caucho se va a comportar mejor ante la fatiga y el ahuellamiento, dado que ahora posee una mejor recuperación elástica.

Las características que se obtuvieron para la mezcla asfáltica modificada son aplicables para las rutas Centroamericanas y para la red vial primaria del país; ya que las velocidades de este tipo de rutas son de aproximadamente de 30 a 40 km/hr, puesto que al tener una fluencia Marshall baja, la mezcla asfáltica tiene la capacidad de recibir varias cargas cíclicas generadas por los vehículos en el donde la mezcla va a ser capaz de recuperarse de una mejor manera debido a su aumento en la elasticidad. Adicionalmente, debido a que la estabilidad Marshall es un poco baja; esta mezcla es ideal para estas rutas debido a que no hay cargas estáticas permanentes, es decir el tránsito vehicular no es tan denso como para generar velocidades tan bajas en los automóviles, el cual se puedan considerar casi sin movimiento en periodos de tiempo prolongados y repetitivos.

Cuadro 40: Resumen de resultados para el ensayo de la Rueda de Hamburgo

Mezcla asfáltica	Δ - 20,000 (mm)	Ciclo - Δ_{max}	Creep Slope (%)	Δ - SPI (mm)	Ciclos - SPI	Strip Slope (%)
Convencional	19.75	20,000	-0.038	-6.8	12,255	-0.135
Modificada	19.7	20,000	-0.0313	-6.9	14,884	-0.31625

Durante la comparación entre los valores promedio de la mezcla asfáltica convencional y modificada se puede notar que si hubo un cambio significativo. El valor más importante está en el punto de desgranamiento (SPI), ya que, éste nos indica a los cuántos ciclos la mezcla comienza a desgranarse y este valor es necesario debido a que a partir de este de punto la tasa de deformación tiene un mayor incremento hasta llegar a las 20,000 pasadas. El Cuadro 40 muestra que la mezcla modificada tiene un punto de desgranamiento mayor ocurriendo a los 14,884 ciclos, por lo tanto, esta tiene la capacidad de soportar más ciclos antes de desgranarse en comparación con la mezcla convencional, ya que, ésta soporta 12,255 ciclos de carga en donde se puede notar que la modificación del 3% de caucho en la mezcla brinda una mejora en las capacidades mecánicas, ya que, la modificada logró soportar 2,629 ciclos más versus la convencional, lo cual representa un aumento del 21.45% en los ciclos de carga. Asimismo, en el Cuadro 40 se puede apreciar que la mezcla modificada tuvo una deformación muy similar a la mezcla convencional, aunque se puede notar que la mezcla modificada tuvo una mejor recuperación, ya que, tiene casi la misma deformación; pero esta soportó más ciclos de carga. Se puede determinar que la mezcla modificada es más elástica debido a que presentó una deformación o ahuellamiento similar ante mayores ciclos de carga.

Otro valor para tomar en cuenta es el porcentaje de pendiente del creep, ya que, este valor indica la acumulación de la deformación permanente debido al flujo plástico. En el Cuadro 40 se puede notar que la mezcla modificada tiene una menor pendiente de creep (0.0313%), esto demuestra que la mezcla modificada presenta una menor deformación permanente, como consecuencia, esta será menos susceptible a generar grandes ahuellamientos versus la mezcla convencional que tiene una mayor pendiente y acumulará más deformaciones permanentes, causando un mayor ahuellamiento ante los ciclos de carga.

En el Cuadro 40 se puede notar que a los 20,000 ciclos de carga las mezclas tienen una deformación muy similar, sin embargo, según Flores *et al.* (2018) la deformación a las 20,000 pasadas debería de ser 12.5 mm. Adicionalmente, en los Cuadros 25 y 30 se muestran que ambas mezclas tienen un porcentaje de vacíos elevados, los cuales no están entre el rango de 3% al 5% según lo establecido en la sección 401 de las especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes. Esto es debido a que se está evaluando el desempeño de las mezclas asfálticas elaborada con la metodología Marshall y estos requisitos se enfatizan sobre las mezclas asfálticas diseñadas desde el inicio con la metodología Superpave, por lo tanto, la forma de compactación y el empaquetamiento de los agregados es diferente. Con respecto a los ciclos de carga, esto se puede corregir realizando el empaquetamiento de los agregados con la metodología Superpave y/o colocando un promotor de adherencia para

aumentar la cohesión entre el asfalto y el agregado. Al realizar esta corrección, la mezcla modificada llegaría a presentar mejores resultados que la mezcla convencional a causa del comportamiento que se observa en el Cuadro 40. Debido a lo mencionado anteriormente, es necesario que Guatemala emigre urgentemente a la metodología Superpave, ya que, esta metodología permite conocer el comportamiento de la mezcla en condiciones más realistas a las cuales la mezcla será sometida, por lo cual, realizar el diseño con esta metodología garantiza que el concreto asfáltico tenga una mayor vida útil, asegura económicamente la inversión realizada por el sector público y privado, la calidad de servicio de las carreteras será mucho mejor a las que actualmente presentan.

Conclusiones

1. Entre los polímeros utilizados durante el trabajo de investigación, el que brinda mejores propiedades físicas y mecánicas es el caucho; debido a que, durante el proceso de mezclado con el cemento asfáltico, este sí logró adherirse. Por lo cual, el caucho se integra positivamente a la matriz de concreto asfáltico; en cambio el PET no logró la homogenización durante el proceso de mezclado debido a que su punto de fusión es tan alto que no es posible unirlo al asfalto con las temperaturas de mezclado utilizadas; además la densidad del PET es mayor a la del cemento asfáltico (AC-30) utilizado, por lo cual se genera la sedimentación del PET en el proceso de mezclado.
2. El diseño de la mezcla patrón y modificada con caucho poseen los mismos agregados pétreos y la misma integración granulométrica, la única diferencia es la incorporación del 3% del caucho como aditivo en la mezcla asfáltica; esto es lo que provoca las variaciones de los resultados de la gravedad específica bulk, gravedad específica teórica máxima, porcentaje de vacíos, contenido óptimo de cemento asfáltico, estabilidad-flujo Marshall y en la rueda de Hamburgo.
3. El cemento asfáltico al ser modificado con el caucho presentó una mejora en sus características físicas y mecánicas; así como en la penetración, punto de ablandamiento y la recuperación elástica. Por esta razón el cemento asfáltico modificado disminuyó su rigidez, su susceptibilidad a la temperatura y aumentó su resiliencia.
4. La mezcla asfáltica modificada con caucho requiere de un mayor porcentaje de contenido óptimo de asfalto (6%) en comparación con la mezcla convencional (5.58%), debido a que el caucho en el cemento asfáltico genera enlaces entre el agregado y el asfalto; por lo cual es más difícil cubrir las partículas de agregado, en contraste, con el asfalto sin modificar.
5. La mezcla asfáltica modificada con caucho obtuvo mejores resultados en la fluencia Marshall con respecto a la mezcla asfáltica convencional, por consiguiente, la mezcla modificada presenta una mayor recuperación elástica lo cual aumenta su capacidad para soportar repeticiones de carga.

6. No se tuvo una diferencia significativa en la relación estabilidad flujo, por lo tanto, ninguna de las dos mezclas se considera blanda o rígida con respecto a las especificaciones de la metodología Marshall, sin embargo, considerando que el flujo de la convencional es un valor que está cercano al límite superior, es importante complementarlo con un ensayo de desempeño como el de la rueda de Hamburgo para poder observar las diferencias físicas y mecánicas en ambas mezclas.
7. El caucho utilizado en la mezcla es un polímero proveniente del reciclaje de las llantas de automotores, este tipo de polímeros no es potencialmente compatible con la química del cemento asfáltico, sin embargo, se obtuvieron resultados significativos que mejoraron las características físico-mecánicas de las mezclas asfálticas. Además, la utilización de este tipo de polímero puede contribuir a las regulaciones ambientales que se pueden llegar a tener en el futuro para la construcción de carreteras en Guatemala.
8. El ensayo de la rueda de Hamburgo demuestra que la mezcla modificada es más elástica que la mezcla convencional, ya que, presentó un punto de desgranamiento mayor en donde soportó 14,884 ciclos de carga y una deformación de 6.9 mm. Estos valores son mejores que los obtenidos para la mezcla convencional, adicionalmente la pendiente del creep es menor y la deformación permanente por fluencia plástica en la mezcla modificada es menor. Estos resultados rectifican que la modificación de la mezcla asfáltica con 3% de caucho le proporciona mejores características físicas y mecánicas a la mezcla asfáltica.
9. Actualmente ningún laboratorio cuenta con un equipo completo para un diseño por desempeño (Superpave), lo cual hace complicada la evaluación de este tipo de investigaciones, ya que, los mayores beneficios que proporciona los polímeros se alcanzan a ver en los ensayos por desempeño ante la deformación permanente (ahuellamiento) y ante la fatiga (rigidez), es importante que Guatemala incursione en este tipo de metodologías para asegurar la durabilidad de los proyectos carreteros que se ejecuten en un futuro. Por lo tanto, la prueba de desempeño mostrada en esta investigación se realizó en El Salvador, ya que, ellos sí cuentan con el equipo necesario para realizar el ensayo de la rueda de Hamburgo.

Recomendaciones

1. Las características obtenidas para la mezcla asfáltica modificada son aplicables para las rutas Centroamericanas y para la red vial primaria del país; debido a que la mezcla asfáltica tiene la capacidad de recibir varias cargas cíclicas generadas por los vehículos a causa de la disminución en la fluencia Marshall, por el cual la mezcla tiende a ser capaz de recuperarse en mejor manera debido a su aumento en la elasticidad. Adicionalmente, dado que la estabilidad Marshall es un poco baja; esta mezcla es ideal para estas rutas, puesto que en estas no hay cargas estáticas permanentes en periodos de tiempo prolongados y repetitivos.
2. Al obtener los resultados del ensayo de estabilidad-fluencia Marshall es importante analizarlos conjuntamente, así como se analiza en la relación estabilidad-flujo (rigidez Marshall), ya que si alguna persona desea analizar los resultados individualmente y no tiene mayor conocimiento sobre estos parámetros puede interpretarlos erróneamente; ya que si un valor en los resultados es bajo, esta persona puede indicar que no hay un buen diseño en la mezcla o una mejora en la modificación aunque la mezcla tenga resultados óptimos en el otro parámetro. Por lo cual, es esencial utilizar la relación estabilidad Marshall a razón de que este da un valor más puntual; tomando en cuenta la estabilidad y la fluencia, además con este valor es más sencillo y certero el saber si hay o no un buen diseño en la mezcla asfáltica. Asimismo, para garantizar una buena interpretación de los resultados es necesario complementarlo con ensayos por desempeño que están establecidos en la metodología Superpave
3. Para mejorar aún más la mezcla asfáltica modificada es necesario modificar el concreto asfáltico con diferentes porcentajes de caucho para encontrar el óptimo en el cual se obtenga los máximos beneficios e identificar a partir de qué porcentaje la mezcla ya no tiene no mejoras y/o se observe una reducción en sus características físicas y mecánicas.
4. Siempre que se mezcle un polímero reciclado, por ejemplo, el caucho con el cemento asfáltico; es importante utilizar el tamaño de partícula más pequeño posible para garantizar una mejor incorporación del polímero con el cemento asfáltico y analizar la compatibilidad obtenida del polímero con el cemento asfáltico.

5. No se recomienda utilizar el PET como un material modificador para las mezclas asfálticas caliente, en dado caso que se quiera utilizar; este material es necesario realizar un análisis químico de la compatibilidad del PET con el asfalto y con esta información verificar si hay o se puede producir un potenciador de adherencia para el polímero con el asfalto.
6. Se debe de variar el porcentaje de modificación de caucho para determinar el porcentaje optimo en el cual se obtengan las mejores propiedades físico-mecánicas en la mezcla asfáltica.
7. Al comparar diseños de mezcla asfáltica para analizar los efectos que tuvo un agente modificador, es importante realizar el diseño de una mezcla patrón y que la mezcla modificada tenga el mismo diseño granulométrico; ya que un pequeño cambio en la granulometría o en el origen de los agregados puede generar grandes variaciones en las características de las mezclas asfálticas y, por lo tanto, generar resultados erróneos.
8. Luego de cumplir con los requisitos de laboratorio para una mezcla modificada es importante analizar las adecuaciones que se deben de realizar a las plantas de asfalto para poder producir esta mezcla asfáltica modificada, además es necesario que estas adecuaciones sean económicamente viables para la producción industrial, es decir, es necesario validar la posibilidad de la producción de la mezcla asfáltica modificada en grandes cantidades.
9. El gremio de asfaltos en Guatemala debe de incrementar la implementación del método Superpave para que los laboratorios en el país cuenten con el equipo necesario para poder utilizar este método y que no sea necesario viajar para realizar ensayos a países vecinos que si lo tienen. Además, esto permitirá diseñar y evaluar los métodos actualmente utilizados para garantizar una mejor vida útil del concreto asfáltico en la red vial del país.
10. Esta investigación será de utilidad para el sector educativo ya que ellos podrán utilizar el estudio para enseñar como un material considerado como basura pueda ayudar a mejorar las propiedades de una carretera. Por lo tanto, puede abrir el panorama de muchos estudiantes para considerar o incluir materiales que se consideran insignificantes en procesos de elaboración de materiales de construcción, permitiendo reducir el impacto que pueden llegar a tener estos materiales.

- ADATEC. (2015). *PAVELAB DWT, equipo huella de doble rueda, tipo Hamburgo*. <http://www.adatec.co.cr/route.php?url=pavelabdwtequiporuedacargadadobletipohamburgo>
- Asfalca. (2020). *INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS. Km. 39.5 carretera a Sonsonate, Cantón 3 Ceibas, Armenia, Sonsonate, El Salvador*.
- Barrera, J. (2014). *FALLAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES: CAUSAS, EFECTOS Y SOLUCIONES* (Tesis doctoral). Universidad de San Carlos de Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3838_C.pdf
- Bernhard, A. (2009). *UTILIZACIÓN DE HULE RECICLADO DE NEUMÁTICOS EN PAVIMENTOS*. Universidad del Valle de Guatemala.
- Caminos. (2001). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES*. <http://www.covial.gob.gt/specs/LibroAzul-Sept2001.pdf>
- Contenco. (2019). *CALIBRATOR PROPORCIONAL I-3054*. Recuperado el 7 de febrero de 2020, desde <https://www.contenco.com.br/produto/calibrador-proporcional-i-3054/>
- Corredor, G. (2010). *Maestría en Vías Terrestres Módulo III Diseño de Pavimentos I*. Recuperado el 2 de marzo de 2020, desde <https://docplayer.es/5535230-Maestria-en-vias-terrestres-modulo-iii-diseno-de-pavimentos-i-evaluacion-de-pavimentos.html>
- Díaz, C. & Castro, L. (2017). *IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA MEJORAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ*. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2633>
- Fitts, G. (2020). *Hamburg Wheel Tracking (HWT) Test - Asphalt Institute*. <https://www.ltrc.lsu.edu/asphalt/pdf/Hamburg%20Wheel%20Tracking%20Test.pdf>
- Flores, M., Delgado, H. & Gómez, J. (2018). *Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo*. IMT. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt568.pdf>
- Gabela, D. (2013). *PLAN DE MANTENIMIENTO DE LA CARPETA ASFÁLTICA DE LA SECCIÓN DEL PASO LATERAL DE AMBATO COMPRENDIDA ENTRE*

- HUACHI GRANDE Y EL REDONDEL DEL TERREMOTO*. Recuperado el 2 de marzo de 2020, desde <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/6030/T-PUCE-6284.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gómez, C. (2018). *PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO ASFÁLTICO, MODIFICADO CON RESIDUOS DE VIDRIO TEMPLADO Y CAL, COMPARADO CON UNA MEZCLA DE DISEÑO TRADICIONAL* (Tesis doctoral). Universidad de San Carlos de Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_4353_C.pdf
- Guevara, L. (2008). *EVALUACIÓN DE OPCIONES PARA LA REUTILIZACIÓN DE LLANTAS EN GUATEMALA*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Hernández, J. (2015). *ANÁLISIS DEL MANTENIMIENTO DE CARRETERAS DE CONCRETO ASFÁLTICO EN CALIENTE* (Tesis doctoral). Universidad de San Carlos de Guatemala. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3197/>
- INE, B. & IARNA. (2013). *Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica de Guatemala 2001-2010: SCAE 2001-2010*. <http://www.infoiarna.org.gt/wp-content/uploads/2017/11/CompendioestadisticoSCAETOMOII.pdf>
- Institute, A. (2014). *MS-2 Asphalt Mix Design Methods* (7th Edition).
- MATEST. (2018). *Equipo para Equivalente de Arena*. Recuperado el 7 de febrero de 2020, desde <https://www.contenco.com.br/produto/calibrador-proporcional-i-3054/>
- Morales, P. (2015). *Construcción y conservación de vías* (Vol. 2nd Editio).
- Ortíz, B. (2017). *MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO AGREGADO POR EL MÉTODO DE MARSHALL*. Universidad de San Carlos de Guatemala. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8111/>
- Perenco. (2020). *Logo de empresa proveedora de asfalto en Guatemala*. <https://www.perenco.com/es/filiales/guatemala>
- Reyes, F. (2003). *Diseño racional de pavimentos*. (1st Edition).
- Rondón, H. & Reyes, F. (2015). *Pavimentos materiales, construcción y diseño*. (1st Editio).
- Sánchez, C., Peña, J. & Rico, L. (2018). *Identificación de los usos actuales del tereftalato de polietileno (PET) Reciclado en la Ingeniería Civil*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Tarbuck, E. & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra una introduccion a la geología física*. (2nd Edition).
- UTEST. (2016). *Máquina de Abrasión Los Ángeles*. Recuperado el 7 de febrero de 2020, desde <http://www.utest.com.tr/es/25827/M-quina-de-Abrasi-n-Los-ngelesm>



Figura 74: Ensayo de equivalente de arena después de la sedimentación



Figura 75: Esferas de acero que se utilizan en la máquina de los ángeles



Figura 76: Lavado de agregado para determinación de la gravedad específica del agregado



Figura 77: Realización del ensayo de penetración para el cemento asfáltico modificado



Figura 78: Resultado del ensayo de recuperación elástica por torsión para el cemento asfáltico convencional



Figura 79: Colocación del cemento asfáltico convencional en anillos de soporte y de bolas de aceros



Figura 80: Resultado de punto de ablandamiento para el cemento asfáltico modificado



Figura 81: Quintal de caucho



Figura 82: PET recolectado



Figura 83: Martillo de compactación de operación manual



Figura 84: Mezclado de agregados pétreos y cemento asfáltico



Figura 85: Extracción de la probeta del molde cilíndrico



Figura 86: Probeta de concreto asfáltico modificado luego de su extracción del molde



Figura 87: Vista en planta de probeta de concreto asfáltico convencional y modificado

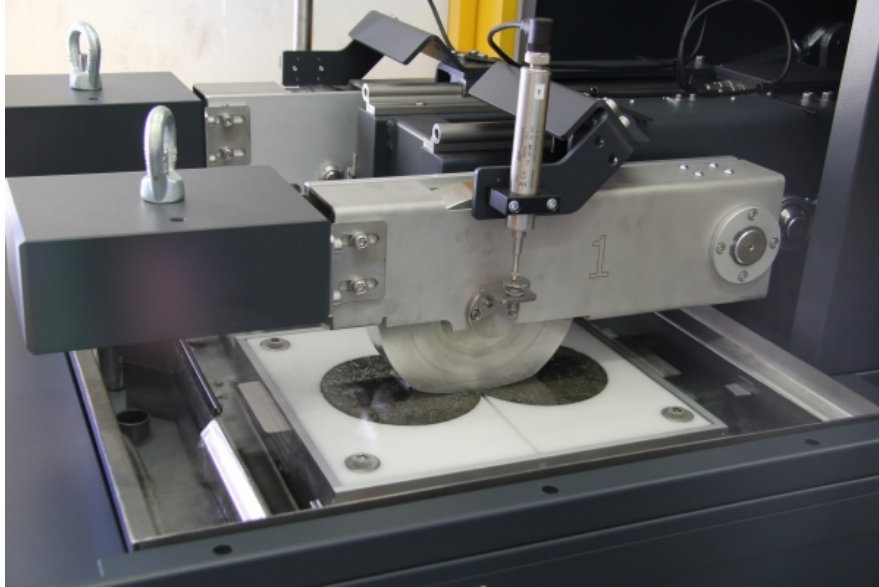


Figura 88: Ejemplo de operación de la rueda de Hamburgo
(ADATEC, 2015)



Figura 89: Ejemplo de falla de la rueda de Hamburgo
(Fitts, 2020)

Cuadro 41: Pagina número 1 del informe del ensayo de la Rueda de Hamburgo realizada en El Salvador para la mezcla convencional

LABORATORIOS ASFALCA S.A. DE C.V. Km. 39½ CARRETERA A SONSONATE, CANTÓN 3 CEIBAS, ARMENIA, SONSONATE INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AASHTO T324-17							
DATOS GENERALES							
Empresa:	Control de calidad interno						
Proyecto:	Control de calidad interno						
Dirección:				Procedencia:	Planta Juliapa, Guatemala		
Solicitante:				Muestreó:	Cliente (08/10/20)		
Tipo muestra:	Mezcla asfáltica TMN 3/4" con AC30			Id. muestra:	MAC-20-072		
Compactación:	Compactador giratorio SUPERPAVE			Ensayó:	Ing. Ricardo Flores E.		
Producción:	Planta			Fecha:	5/11/2020		
GRAVEDAD ESPECIFICA TEÓRICA MÁXIMA DE MEZCLA ASFÁLTICAS EN CALIENTE							
	Muestra:	1	2	3	PROMEDIO		
	Peso seco de muestra de mezcla suelta al aire:	2,528.3 gr.	2,531.9 gr.	-	-		
	Peso de picnómetro calibrado + agua (25°C):	7,639.3 gr.	7,639.3 gr.	-	-		
	Peso de picnómetro + agua (25°C) + Muestra:	9,130.8 gr.	9,132.7 gr.	-	-		
	Gravedad específica teórica máxima (Gmm):	2.439	2.438	-	2.439		
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS							
Muestra	Diámetro	Altura	Peso seco	Peso SSS	Peso sumer.	Gs BULK	% Vacíos
1	150.0 mm.	61.0 mm.	2,295.8 gr.	2,323.3 gr.	1,305.9 gr.	2.257	7.5%
2	150.0 mm.	61.0 mm.	2,304.8 gr.	2,328.3 gr.	1,308.9 gr.	2.261	7.3%
3	150.0 mm.	61.0 mm.	2,303.8 gr.	2,327.8 gr.	1,306.9 gr.	2.257	7.5%
4	150.0 mm.	61.0 mm.	2,304.9 gr.	2,328.8 gr.	1,308.0 gr.	2.258	7.4%
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LA RUEDA DE HAMBURGO							
Muestra	Temperatura	Δ - 20,000	Ciclos - Δmax	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
1							
2	51.9°C	-18.4 mm.	20,000	-0.0275%	-6.6 mm.	14,872	-0.1250%
3							
4	51.9°C	-21.1 mm.	20,000	-0.0485%	-7.0 mm.	9,637	-0.1450%

(Asfalca, 2020)

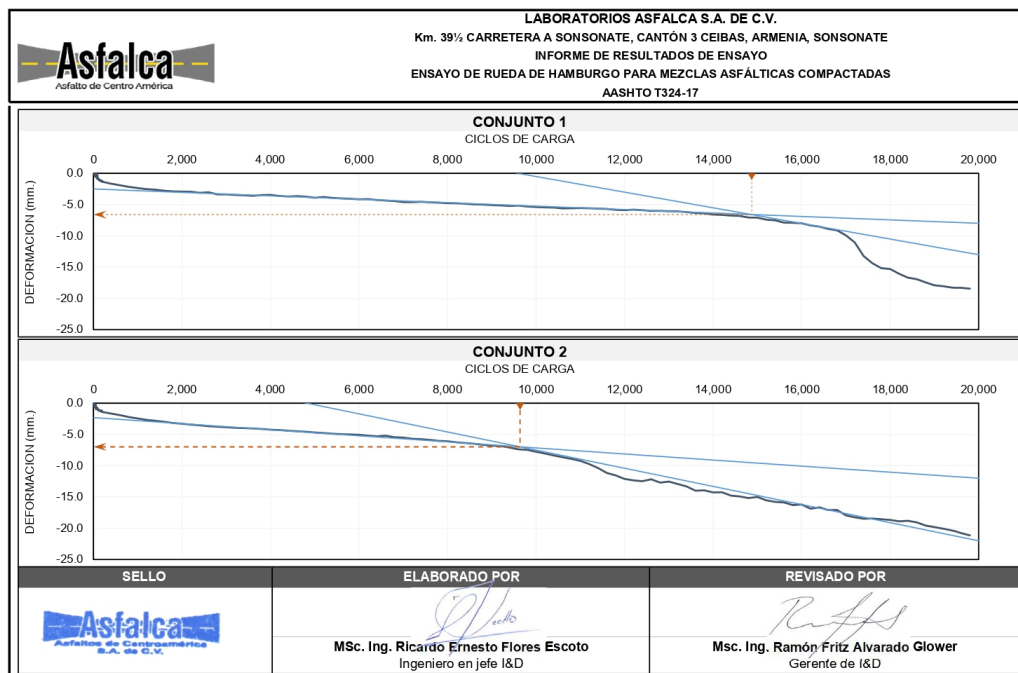



Figura 90: Pagina número 2 del informe del ensayo de la Rueda de Hamburgo realizada en El Salvador para la mezcla convencional
(Asfalca, 2020)

Cuadro 42: Pagina número 1 del informe del ensayo de la Rueda de Hamburgo realizada en El Salvador para la mezcla modificada

 LABORATORIOS ASFALCA S.A. DE C.V. Km. 39½ CARRETERA A SONSONATE, CANTÓN 3 CEIBAS, ARMENIA, SONSONATE INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS AASHTO T324-17							
DATOS GENERALES							
Empresa:							
Proyecto:	Control de calidad interno						
Dirección:							
Solicitante:	Procedencia: Planta Juliapa, Guatemala						
Tipo muestra:	Muestra: Cliente (08/10/20)						
Compactación:	Id. muestra: MAC-20-072						
Producción:	Ensayó: Ing. Ricardo Flores E.						
	Fecha: 3/11/2020						
GRAVEDAD ESPECIFICA TEÓRICA MÁXIMA DE MEZCLA ASFÁLTICAS EN CALIENTE							
Muestra:	1	2	3	PROMEDIO			
Peso seco de muestra de mezcla suelta al aire:	2,512.9 gr.	2,519.3 gr.	-	-			
Peso de picnómetro calibrado + agua (25°C):	7,639.3 gr.	7,639.3 gr.	-	-			
Peso de picnómetro + agua (25°C) + Muestra:	9,124.5 gr.	9,127.7 gr.	-	-			
Gravedad específica teórica máxima (Gmm):	2.445	2.444	-	2.445			
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS							
Muestra	Diámetro	Altura	Peso seco	Peso SSS	Peso sumer.	Gs BULK	% Vacíos
1	150.0 mm.	61.0 mm.	2,272.3 gr.	2,282.4 gr.	1,280.9 gr.	2.269	7.2%
2	150.0 mm.	61.0 mm.	2,273.3 gr.	2,287.2 gr.	1,285.4 gr.	2.269	7.2%
3	150.0 mm.	61.0 mm.	2,309.4 gr.	2,320.0 gr.	1,305.2 gr.	2.276	6.9%
4	150.0 mm.	61.0 mm.	2,312.3 gr.	2,325.4 gr.	1,308.2 gr.	2.273	7.0%
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LA RUEDA DE HAMBURGO							
Muestra	Temperatura	Δ - 20,000	Ciclos - Δmax	Creep Slope	Δ - SPI	Ciclos - SPI	Strip Slope
1							
2	50.0°C	-18.7 mm.	20,000	-0.0375%	-8.2 mm.	15,306	-0.2825%
3							
4	50.0°C	-20.7 mm.	20,000	-0.0250%	-5.6 mm.	14,462	-0.3500%

(Asfalca, 2020)

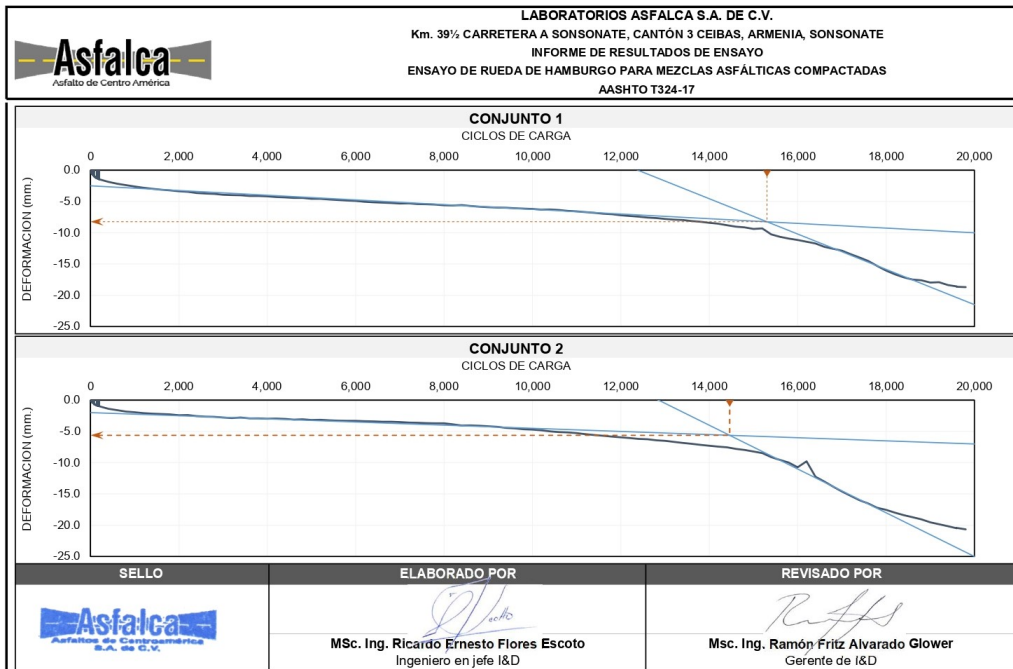


Figura 91: Pagina número 2 del informe del ensayo de la Rueda de Hamburgo realizada en El Salvador para la mezcla modificada

(Asfalca, 2020)

AC20 Son fabricados a partir de los fondos de la destilación al vacío de hidrocarburos naturales. Estos se someten a un proceso industrial para lograr cumplimiento de especificaciones y obtener una característica de viscosidad absoluta comprendida entre 1600 y 2400 Poises, a 60°C. El uso principal de los cementos asfálticos AC-20 es la construcción y conservación de carreteras. La selección del tipo adecuado estará en función de las características climáticas de la zona y las condiciones de operación de la vía a intervenir, según especificaciones internacionales y/o condiciones de un proyecto. 76

AC30 Son fabricados a partir de los fondos de la destilación al vacío de hidrocarburos naturales. Estos se someten a un proceso industrial para lograr cumplimiento de especificaciones y obtener una característica de viscosidad absoluta comprendida entre 2400 y 2600 Poises, a 60°C. El uso principal de los cementos asfálticos AC-30 es la construcción y conservación de carreteras. La selección del tipo adecuado estará en función de las características climáticas de la zona y las condiciones de operación de la vía a intervenir, según especificaciones internacionales y/o condiciones de un proyecto. 76

agentes climáticos Temperatura, humedad relativa y precipitación, la temporalidad. 30

agitador mecánico Es ideal para una agitación mecánica en fluidos, líquidos de media viscosidad, material en suspensión y todas las aplicaciones de laboratorio que requieran una actividad de solución de mezclado. Este agitador funciona con movimientos mecánicos de vibración, balanceo, rotación o giro de varillas de la solución. 79

aglutinante Sustancia usualmente líquida, que se usa para disolver o desleír las sustancias que componen los pigmentos. Uno de los principales usos que se le dan a los asfaltos es, entre otros, como material aglutinante en la elaboración de carpetas asfálticas para la construcción de pavimentos flexibles. 126

agregado fino Los agregados que pasan el tamiz No.4 y son retenido en el tamiz No. 200. 72

- agregado grueso** Son todos los agregados retenidos en el tamiz No.4 . 23
- ahuellamiento** Los daños producidos en las carpetas asfálticas que han sido identificados, son conocidos como deformaciones permanentes (ahuellamiento). 37, 132
- anillo dinamométrico** Se utiliza para detectar la carga de compresión aplicada por la máquina de prueba. 106
- aniónica** Este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad negativa a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga negativa. 55
- asfáltenos** Compuestos químicos insolubles en n-heptano que pueden ser separados mediante la digestión del asfalto. Peso molecular con un rango de 1000 a 50000 kg/kgmol, que se encuentran en dispersión coloidal en algunos crudos. Se definen como fracciones que se encuentran en el crudo, solubles en solventes aromáticos como el benceno, tolueno y xileno, pero insoluble en n-alcanos de cadena corta (bajo peso molecular) como por ejemplo el n-pentano, y pueden ser derivados del petróleo y/o carbón. 51
- balanza** Es un instrumento que sirve para medir la masa de los objetos. Es una palanca de primer grado de brazos iguales que, mediante el establecimiento de una situación de equilibrio entre los pesos de dos cuerpos, permite comparar masas. 81
- base** Es la capa formada por la combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural, clasificados o con trituración parcial para constituir una base integrante de un pavimento. 25
- biodegradable** Es el producto o sustancia que puede descomponerse en los elementos químicos que lo conforman, debido a la acción de agentes biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales. 39
- bitumen** Aglomerante proveniente de la fracción pesada de la destilación del petróleo crudo. 33, 131
- capa asfáltica** Es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir. 59
- capas de rodadura** Es un tratamiento superficial no muy espeso, ya que es menor a los 4 centímetros, conformado por una mezcla de agregados pétreos y asfalto. Dicha capa se puede producir en frío o en caliente, y tiene como finalidad el proteger la superficie del pavimento de los agentes externos que pudieran causarle daño. 50
- cara fracturada** Superficie angular, rugosa o rota de una partícula de agregado pétreo creada por aplastamiento, por otros medios artificiales o por naturaleza. 89
- carga monotónica** Es un tipo de ensayo en el que la carga va aumentando de cero hasta la rotura sin producirse descargas. 58
- catiónica** Este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad positiva a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga positiva. 55

- cauchos sintéticos** Es un tipo de elastómero, invariablemente un polímero. Un elastómero es un material con la propiedad mecánica de poder sufrir mucha más deformación elástica bajo estrés que la mayoría de los materiales y aun así regresar a su tamaño previo sin deformación permanente. El caucho sintético sirve como un sustituto del caucho natural en muchos casos, especialmente cuando se requieren propiedades mejoradas de los materiales. 34
- cemento asfáltico** Material esencial utilizado como pegante para garantizar la cohesión y la estabilidad del pavimento. 121
- componente aromático** Compuestos químicos que son adsorbidos por la fase estacionaria en presencia de n-heptano y eluidos con tolueno. 37
- comportamiento viscoelástico** El cuerpo sobre el que se aplica el esfuerzo recupera parte de la deformación aplicada. 46
- concesión de carreteras** Es un contrato de largo plazo, que se firma entre un ente público, institución o gobierno del mismo carácter y una empresa o inversionista privado. El objetivo final es desarrollar infraestructura y brindar servicios para los usuarios. 49
- concreciones** Término que se aplica a agregados primarios desarrollados durante la sedimentación, los cuales forman masas discretas encerradas en el cuerpo principal del sedimento. 30
- concreto asfáltico** Mezcla de cemento asfáltico con agregados pétreos que poseen una granulometría bien gradada. Asimismo, este se fabrica, se coloca y se compacta a altas temperaturas. 123
- concreto hidráulico** Mezcla de Agregados graduados, cemento y agua. 21
- criogénico** Conjunto de técnicas utilizadas para enfriar un material a la temperatura de ebullición del nitrógeno o a temperaturas aún más bajas. 36
- deformímetro de lectura final fija** Es un medidor de deformación del espécimen. 107
- elastómeros** Es un polímero cuya característica principal es la elasticidad pudiendo incluso, recuperar su forma luego de ser deformado. 33
- emulsiones de rompimiento lento** Se diseñan para mezclarse con agregados finos, se utilizan comúnmente para carpetas asfálticas en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas. 42
- emulsiones de rompimiento medio** Designadas para ser mezcladas con agregado porque no rompen al instante de entrar en contacto con el agregado. 42
- emulsiones de rompimiento rápido** Estas tienen poca o ninguna capacidad para mezclarse con agregados, se emplean normalmente para riegos de sellos, sellos de arena y tratamientos superficiales en general; para reaccionar rápidamente con el agregado y revertir al estado del asfalto. 42

equivalente de arena Es una prueba de laboratorio, que se realiza con el objeto de determinar qué porcentaje de una muestra se puede considerar como arena. De manera muy simple lo que se hace es separar por medio de una solución química las partículas finas o polvos de las arenas. Se considera que una arena tiene una excelente calidad si tiene un equivalente superior al 90 %. 81

estabilidad Capacidad de la mezcla asfáltica para soportar deformación y desplazamiento bajo la aplicación de una carga. 108, 133

estabilidad-flujo Marshall Este método sirve para la medición de la resistencia al flujo plástico de especímenes cilíndricos de mezcla asfáltica para pavimentos, con un diámetro de 102 mm, aplicando la carga en la dirección perpendicular al eje cilíndrico utilizando el equipo Marshall. Este método se utiliza en mezclas asfálticas de graduación densa, preparadas con cemento asfáltico (modificado o sin modificar), asfaltos rebajados, brea, o brea-hule y con agregados de tamaño máximo hasta de 25 mm (pasando el tamiz de 25 mm). 106

estratificación Surge por el depósito alternado de rocas de diferentes tamaños de grano. 26

estándares de calidad Son puntos de referencia que sirven para fijar un mínimo de condiciones, a fin que las características de un producto o servicio sean capaces de satisfacer eficientemente las necesidades de los consumidores. 37

fluencia Capacidad de una mezcla asfáltica para acomodarse a los asentamientos bajo una carga aplicada. Esta deformación se mide en centésimas de pulgada. 129

gelificación Es el proceso mediante el cual se forma un gel. 50

gradación se refiere a las proporciones de partículas de diferentes tamaños en un agregado total dado. 23, 90

granulometría Es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado, tal como se determina por análisis de tamices. Es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica. 91

gravedad específica de Bulk Es la relación entre la masa (peso en el aire) de un volumen dado de material a una determinada temperatura, generalmente a 25°C para mezclas asfálticas, y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura. 103

gravedad específica También conocida como peso específico o densidad relativa, consiste en la relación o cociente que existe entre la densidad de una sustancia y la densidad de otra sustancia de referencia (es usual que en este caso se utilice agua). 121

ligante asfáltico Son elaborados a partir del pitch asfáltico o residuo proveniente de la destilación del crudo petróleo de origen importado. 38

- ligantes bituminosos** Material que contiene betún (bitumen), el cual es un hidrocarburo soluble en bisulfuro de carbono (CS₂). El asfalto y el alquitrán son materiales bituminosos. Asfalto. Proporcionan elasticidad al pavimento, característica por la cual los pavimentos bituminosos reciben el nombre de flexibles. 41
- micelas** Conjunto de moléculas que constituye una de las fases de los coloides. Es el mecanismo por el cual el jabón solubiliza las moléculas insolubles en agua, como las grasas. 53
- máquina de rueda cargada de Hamburgo** Es ampliamente utilizada para evaluar mezclas asfálticas en relación a su susceptibilidad a la deformación permanente en condiciones de humedad. Los especímenes pueden ser fabricados en el laboratorio usando el compactador giratorio o bien ser extraídos de la superficie de una carretera. 108
- método Superpave** Establece nuevos ensayos orientados a medir las propiedades reológicas de éstos y de relacionarlas con el desempeño que tienen frente a los tres tipos de fallas más clásicas que ocurren en los pavimentos durante su vida útil (ahuellamiento, agrietamiento por fatiga, y agrietamiento térmico). 62
- obras viales** El conjunto de elementos que permite el desplazamiento de vehículos en forma confortable y segura desde un punto a otro. 24
- pavimento flexible** Son aquellos pavimentos en que su estructura se deflecta o flexiona. Estos pavimentos están formados por una carpeta bituminosa, apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, denominadas base y sub-base, las cuales se construyen sobre una capa subrasante. 25
- penetrómetro** Aparato para la medida de las penetraciones en el cemento asfáltico. 92
- petróleos brutos** En las refinerías se lo somete a una destilación fraccionada, que equivale a repetir un buen número de veces una destilación simple. Aunque no origina la separación de cada uno de los hidrocarburos, produce una serie de fracciones (gasolina, queroseno, etc.) con diferentes intervalos de ebullición, que ya son productos de alto consumo. 41
- picnómetro de vacíos** Sirve para la determinación de la gravedad específica de mezclas bituminosas, utilizadas en pavimentos asfálticos. 104
- planta de trituración** Consta de maquinarias utilizadas para transformar grandes bloques de piedras pequeñas, arenilla y arena. 59, 76
- plastómeros** Estos materiales plásticos se pueden deformar al calentarse tantas veces como sea necesario. Se ablandan cuando se calientan por encima de una determinada temperatura, y se endurecen por debajo de dicha temperatura. 41
- porcentaje de vacíos** Este puede ser medido directamente utilizando el peso unitario y la gravedad específica del material, o también en algunos casos midiendo la cantidad de agua necesaria para inundar una muestra de agregado que ha sido compactada en un contenedor. 106

probeta También se conoce como briqueta. Mezcla asfáltica formada por la compactación de un martillo dentro de moldes cilíndricos, la cual es utilizada para realizar ensayos. 78

propiedades fisicoquímicas Son las que nos informan sobre el comportamiento del material ante diferentes acciones externas, como el calentamiento, las deformaciones o el ataque de productos químicos. 30

propiedades físicas Son aquellas características propias de la sustancia, que al ser observadas o medidas no producen nuevas especies químicas. 21, 31

propiedades mecánicas Son las que describen el comportamiento de un material ante las fuerzas aplicadas sobre él, por eso son especialmente importantes al elegir el material del que debe estar construido un determinado objeto. 34

propiedades químicas Son aquellas que al ser observadas o medidas producen nuevas especies químicas. 33

propiedades reológicas del asfalto La reología mide la deformación de los cuerpos que no son ni sólidos ni líquidos, es decir, de cuerpos intermedios entre sólido elástico y líquido viscoso. La reología estudia las siguientes propiedades: 1) La teoría de la elasticidad y resistencia de los materiales. 2) La plasticidad. 3) La viscosidad. 4) La hidráulica. 38

resistencia a la abrasión Es la habilidad de la superficie a resistir el desgaste realizado por el alto tráfico peatonal y de equipo mecánico. Con el tiempo, todas las plantas presentan cierto desgaste y raspaduras en la superficie. 44

roca sedimentaria Son aquellas que se forman por la acumulación y litificación de partículas que se han generado por procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la superficie de la Tierra y que afectan a los distintos tipos de rocas (rocas ígneas, metamórficas e incluso sedimentarias). 27

SBR Es un copolímero aleatorio de butadieno y estireno, y los dos monómeros se distribuyen aleatoriamente en la cadena principal, en la que el porcentaje másico de estireno es del 23,5 % 25 %. 34

SBS Elastómero termoplástico sintético obtenido mediante la polimerización de una mezcla de estireno y de butadieno. 34

sedimentación Es el proceso por el cual se depositan o precipitan los materiales transportados por distintos agentes (gravedad, escorrentía, glaciares o viento) y procedentes de la erosión y la meteorización de las rocas, pasando a ser sedimentos. 80

sifón Es un dispositivo hidráulico que se utiliza para trasvasar un líquido de un recipiente a otro. 78

stripping Es la manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua al interior de una mezcla en pavimentos flexibles o pérdida de recubrimiento del asfalto de la superficie de los agregados. 44

subbase Es la capa de la estructura del pavimento, destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad el efecto de las cargas del tránsito proveniente de las capas superiores del pavimento, de tal manera que el suelo de sub-rasante las pueda soportar. 25

susceptibilidad térmica Es la variación de la consistencia de los asfaltos frente a los cambios de temperatura. 44

sustancias deletéreas Sustancias dañinas que pueden estar presentes en los agregados son: impurezas orgánicas, sedimentos, arcilla, carbón y lignito, partículas suaves y ligeras. 24

tamiz Utensilio que consiste en una malla de filamentos. 24, 78

tixotrópicos Es aquel que en condiciones normales es viscoso (incluso sólido) pero que se vuelve líquido al agitarlo con más o menos fuerza. 53

viscosidad La viscosidad es una propiedad importante de los líquidos que describe la resistencia del líquido al flujo y está relacionada con la fricción interna en el líquido. 37

válvula de purga Es en teoría un solenoide, de tipo normalmente cerrada (sin flujo) y se abre (fluye) al ser controlada por la ECU. Esta válvula controla la aplicación del vacío del múltiple para purgar el sistema evaporador. 104