



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE ASFALTOS  
ADITIVADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MEZCLAS  
PARA BACHEO**

**TESIS  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:  
JULIO CESAR MORALES PEDRAZA**

**ASESOR:  
DR. JORGE ALARCÓN IBARRA**

**CO-ASESOR:  
M.I EYMARD ÁVILA VÁZQUEZ**

**MORELIA, MICHOACÁN**

**JUNIO, 2017**

## Dedicatorias

Dedico esta tesis a mis padres, Angelina y César, gracias a su apoyo y sacrificio fue posible culminar una etapa más en mi vida, son la motivación de mi esfuerzo y trabajo.

*“Si quieres ir rápido camina solo, si quieres llegar lejos ve acompañado”*

## Agradecimientos

A la empresa Sem Materials México, por la oportunidad de trabajar con ellos a lo largo de la elaboración de esta tesis, por el apoyo y trato recibido durante mi estancia en Puebla, a Rosita Martínez por la confianza depositada en los tesisistas, quedo totalmente agradecido con ustedes.

Agradezco a mi asesor el Dr. Jorge Alarcón, no solo por ejercer como asesor de esta tesis, si no como tutor y mentor durante parte de mis estudios en la facultad, por brindarme la oportunidad y estar dispuesto a colaborar conmigo durante este tiempo.

Al equipo de trabajo del laboratorio en Puebla, a los ingenieros Eymard, Antonio, Silverio, Alberto, Jesús S. y Jorge M., sin demeritar a las demás personas dentro del taller, por la paciencia y el trato recibido durante ese tiempo, no solo adquirí conocimientos por parte de ustedes, también adopte un compañerismo dentro de Sem.

A las personas que hicieron más amena mi estancia en Puebla, no es fácil llegar a un lugar en donde no conoces a nadie, a los ingenieros Carlos, Jonathan, Eliezer, Alfonso, Rafa, Jesús, Coria, Gerardo, por los gratos momentos.

A Luis e Imer, por su amistad y compañerismo, no era sencillo cambiar de hábitos y de costumbres, se planteaba como un reto por ser la primera ocasión para los tres, sin embargo fue fácil sobreponerse a cada situación, se aprendió y se disfrutó de cada circunstancia.

A mis amigos Héctor, Pablo, Mauricio y Rodrigo, por su confianza y motivación para terminar un logro más en mi vida académica, por sus buenas palabras y maneras de darme ánimo de no desistir, seguir adelante y siempre pasar momentos inmemorables junto con ustedes.

A mis familiares, primos y tíos que estuvieron presentes y al pendiente de mi familia, su apoyo no solo fue importante para mí, sino para mis padres y hacer más sencillo los momentos de adversidad presentes durante el tiempo que estuve lejos de mi familia.

A mis compañeros y amigos de la facultad, aquellos con los que compartí momentos académicos y de placer durante este tiempo, además de los años de trabajo y esfuerzo en la carrera, esta tesis representa el cierre de un ciclo de sacrificios y alegrías, que no hubiera sido posible llegar hasta aquí sin el apoyo de todos ustedes Blancas, Dani, Eligio, Fidel, Gabriel, Juan, Ariel, Iván, Ivón, Mar, Mayra y Orlando por mencionar algunos, gracias.

# Índice

Resumen .....	1
Abstract .....	2
Introducción .....	3
Objetivos.....	4
Capítulo 1. Pavimentos Flexibles.....	5
1.1 Definición.....	5
1.2 Agregados pétreos. ....	8
1.2.1 Clasificación por naturaleza.....	9
1.2.2 Clasificación por origen. ....	10
1.2.3 Clasificación por tamaño.....	10
1.3 Asfalto. ....	11
1.3.1 Composición y procedencia del cemento asfáltico.....	12
1.3.2 Tipos de asfalto. ....	14
1.3.3 Clasificación de los cementos asfálticos. ....	18
1.3.4 Características y propiedades del asfalto. ....	19
1.4 Condiciones de los pavimentos en México. ....	21
Capítulo 2. Deterioros en los Pavimentos Flexibles .....	25
2.1 Generalidades .....	25
2.2 Clasificación de fallas en los pavimentos flexibles. ....	26
2.2.1 Falla Funcional. ....	26
2.2.2 Falla Estructural.....	28
2.3 Principales agentes que deterioran los pavimentos y sus efectos.....	34
2.3.1 Efecto de la intensidad del tráfico y del peso de los vehículos. ....	34
2.3.2 Efecto del agua.....	35
2.3.3 Efecto de la temperatura y del medio ambiente. ....	37
2.3.4 Efecto de un control de calidad deficiente durante la construcción. ....	38
2.4 Causas y niveles de severidad de las fallas en pavimentos flexibles. ....	42
2.4.1 Deformaciones permanentes.....	43
2.4.2 Fisuras y agrietamientos.....	45
2.4.3 Desintegraciones.....	49
Capítulo 3. El bacheo en la conservación vial.....	51
3.1 Conservación de los pavimentos. ....	51
3.2 Métodos de Bacheo.....	53

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

3.2.1	Bacheo provisional o de emergencia.....	55
3.2.2	Bacheo permanente.....	58
3.3	Materiales asfálticos para bacheo.....	63
3.3.1	Mezcla asfáltica en caliente.....	63
3.3.2	Mezcla asfáltica tibia.....	63
3.3.3	Mezcla asfáltica en frío.....	63
3.4	Bacheo en México.....	63
Capítulo 4. Análisis del desempeño de mezclas frías para bacheo con la aplicación de diferentes asfaltos aditivados.....		66
4.1	Generalidades.....	66
4.2	Características y comportamiento de una mezcla fría para bacheo.....	67
4.2.1	Trabajabilidad.....	67
4.2.2	Resistencia a la acción del agua.....	67
4.2.3	Propiedades adhesivas.....	68
4.2.4	Estabilidad.....	68
4.2.5	Resistencia al deslizamiento.....	68
4.2.6	Durabilidad.....	69
4.2.7	Curado.....	69
4.2.8	Almacenamiento.....	69
4.2.9	Resistencia al sangrado de asfalto.....	69
4.2.10	Otras consideraciones.....	70
4.3	Diseño de la mezcla de bacheo.....	70
4.4	Propiedades y caracterización del material pétreo.....	73
4.4.1	Generalidades.....	73
4.4.2	Reducción de muestras.....	74
4.4.3	Peso Volumétrico.....	76
4.4.4	Análisis granulométrico.....	78
4.4.5	Densidad y Absorción de los materiales pétreos.....	85
4.4.6	Partículas planas y alargadas.....	91
4.4.7	Caras fracturadas.....	93
4.4.8	Resistencia mecánica al desgaste de los Ángeles.....	95
4.4.9	Microdeval.....	97
4.4.10	Equivalente de arena.....	99
4.4.11	Azul de metileno.....	101
4.4.12	Angularidad del agregado fino.....	103

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

4.5	Evaluación de la mezcla de bacheo en laboratorio. ....	105
4.5.1	Generalidades. ....	105
4.5.2	Elaboración de prediseños (mezclado). ....	107
4.5.3	Trabajabilidad. ....	113
4.5.4	Raveling. ....	116
4.5.5	Estabilidad Marshall inicial y saturada. ....	119
4.5.6	Pérdida de estabilidad por inmersión de agua de la mezcla. ....	128
4.5.7	Desprendimiento por ebullición. ....	130
4.5.8	Drene. ....	132
4.5.9	Desempeño de la mezcla de granulometría densa. ....	135
Capítulo 5.	Análisis de los resultados. ....	138
5.1	Generalidades. ....	138
5.2	Propiedades y caracterización del material pétreo. ....	138
5.2.1	Análisis granulométrico. ....	140
5.2.2	Trabajabilidad. ....	143
5.2.3	Raveling. ....	146
5.2.4	Estabilidad Marshall inicial, saturada y pérdida por inmersión en agua. ....	147
5.2.5	Compatibilidad asfalto - agregado. ....	148
	Conclusiones y recomendaciones. ....	151
	Referencias. ....	154

## Índice de tablas y figuras.

Figura 1. Esquema de la estructura multicapa de un pavimento asfáltico.....	7
Figura 2. Clasificación de los materiales pétreos. ....	9
Figura 3. Comportamiento del flujo del cemento asfáltico.....	12
Figura 4. Composición del Asfalto.....	13
Figura 5. Proceso de destilación del petróleo.....	14
Tabla 1. Aditivos para modificar asfaltos.....	17
Tabla 2. Clasificación de asfaltos por su viscosidad dinámica a 60°C. ....	19
Tabla 3. Comparativo de Densidad Carretera. ....	22
Figura 6. Esquema de fallas funcionales.....	27
Figura 7. Esquema de fallas estructurales. ....	29
Figura 8. Pavimento asfáltico que presenta agrietamiento por fatiga.....	31
Figura 9. Mecanismo de deformación permanente en pavimentos.....	32
Tabla 4. Principales agentes que deterioran los pavimentos flexibles. ....	41
Tabla 5. Daño por rodera o ahuellamiento. ....	43
Tabla 6. Daño por corrugación. ....	44
Tabla 7. Daño por Agrietamiento longitudinal.....	45
Tabla 8. Daño por Agrietamiento en bloque. ....	46
Tabla 9. Daño por Agrietamiento transversal. ....	47
Tabla 10. Daño por Agrietamiento por fatiga.....	48
Tabla 11. Daño por bache.....	49
Tabla 12. Desintegración de la capa de rodadura.....	50
Figura 10. Clasificación de conservación vial.....	52
Figura 11. Clasificación y técnicas de bacheo.....	54
Figura 12. Técnica de bacheo Throw and go.....	56
Figura 13.1. Técnica de bacheo Throw and roll.....	57
Figura 13.2. Técnica de bacheo Throw and roll.....	57
Figura 14.1. Bacheo por inyección.....	58
Figura 14.2 y 14.3. Bacheo por inyección.....	58
Figura 15. Proceso de cortado de la zona dañada.....	60
Figura 16. Limpieza de la zona.....	61

Figura 17. Aplicación de la emulsión.....	61
Figura 18. Colocación de la mezcla asfáltica .....	62
Figura 19. Compactación de la mezcla .....	62
Figura 20. Obras de bacheo en la ciudad de Puebla, Puebla .....	65
Figura 21. Obras de bacheo en la ciudad de Guadalajara, .....	65
Tabla 13. Denominación de los materiales para elaboración de mezclas de bacheo. .....	71
Figura 22. Proceso de estudio de la mezcla de bacheo.....	73
Figura 23. Cuarteador metálico .....	75
Figura 24. Equipo para pesos volumétricos. ....	77
Tabla 14. Pesos volumétricos del agregado grueso.....	78
Tabla 15. Pesos volumétricos del agregado fino.....	78
Tabla 16. Límites granulométricos para mezclas en frío de bacheo. ....	80
Tabla 17.Requisitos (puntos de control) para granulometría densa Protocolo AMAAC PA-MA 01. ....	81
Figura 25. Gráfica de la curva de granulometría gruesa para bacheo en frío. ....	81
Figura 26. Gráfica de la curva de granulometría fina para bacheo en frío. ....	82
Figura 27. Gráfica de la curva de granulometría intermedia para bacheo en frío..	82
Figura 28. Gráfica de granulometría densa para agregados con TN de 19mm (3/4"). Protocolo AMAAC PA-MA-01. ....	83
Tabla 18. Cantidad mínima de la muestra para análisis granulométrico. ....	84
Tabla 19. Análisis granulométrico del agregado grueso.....	84
Tabla 20. Análisis granulométrico del agregado fino.....	84
Figura 29. Equipo utilizado para el análisis granulométrico.....	85
Tabla 21. Análisis granulométrico del banco la Letra. ....	85
Tabla 22. Cantidad mínima de la muestra para análisis de la densidad del material grueso. ....	86
Figura 30. Peso sumergido de la muestra.....	87
Tabla 23. Densidad y absorción del agregado grueso. ....	88
Figura 31. Picnómetro más muestra más agua, prueba de densidad del fino.....	89
Tabla 24. Densidad absorción del agregado fino. ....	90

Figura 32. Dispositivo de pinza proporcional para evaluación ASTM D4791. ....	92
Tabla 25. Muestra mínima para partículas planas y alargadas. ....	92
Tabla 26. Fracciones a evaluar para partículas planas y alargadas.....	92
Tabla 27. Partículas planas y alargadas, banco Tonalá.....	93
Tabla 28. Muestra mínima para caras fracturadas.....	94
Tabla 29. Caras fracturadas, banco Tonalá.....	94
Figura 33. Máquina de desgaste de los Ángeles.....	95
Figura 34. Carga abrasiva para prueba desgaste de los Ángeles.....	95
Tabla 30. Integración de la muestra para la prueba Desgaste de los Ángeles. ....	96
Tabla 31. Desgaste de los Ángeles, banco Tonalá.....	97
Tabla 32. Muestra para microdeval de TN de 3/4". ....	97
Tabla 33. Tiempo de abrasión de Microdeval.....	98
Figura 35. Prueba de Microdeval. ....	98
Tabla 34. Microdeval, banco Tonalá.....	99
Figura 36. Prueba de Equivalente de arena.....	100
Tabla 35. Equivalente de Arena, banco Tonalá.....	101
Figura 37. Prueba de azul de metileno.....	102
Tabla 36. Azul de metileno, filler banco Tonalá.....	102
Tabla 37. Muestra para prueba de angularidad.....	103
Figura 38. Embudo para prueba de angularidad del fino. ....	103
Tabla 38. Angularidad del agregado fino, banco Tonalá.....	104
Figura 39. Esquema del proceso de evaluación de mezclas en laboratorio.....	105
Tabla 39. Etapas del estudio de la mezcla de bacheo en frío. ....	106
Tabla 40. Prediseños para el Prototipo 1 de asfalto aditivado. ....	108
Tabla 41. Prediseños para el Prototipo 2 de asfalto aditivado. ....	109
Figura 40. Esquema del criterio de selección de los prediseños.....	110
Figura 41. Proceso de mezclado de los prediseños.....	111
Figura 42. Horno para alcanzar temperaturas de mezclado. ....	112
Figura 43 . Premezclado del agregado. ....	112
Figura 44. Mezclador mecánico. ....	112
Figura 43.b. Mezclado de AC-20 y Prototipo2.....	112

Figura 45. Cajas y penetrómetro para la prueba de trabajabilidad.....	114
Figura 46. Prueba a $4 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .....	115
Figura 47. Prueba de trabajabilidad .....	115
Tabla 42. Resultados de trabajabilidad de prediseños mezclados el asfalto aditivado Prototipo 1.....	115
Tabla 43. Resultados de trabajabilidad de prediseños mezclados el asfalto aditivado Prototipo 1.....	116
Figura 48. Equipo de Raveling. ....	117
Figura 48.b. Equipo de Raveling. ....	117
Tabla 44. Raveling de los prediseños aprobados con buena trabajabilidad.....	118
Figura 49. Pre diseño 2 antes de la prueba de Raveling.....	118
Figura 50. Pre diseño 2 después de la prueba de Raveling.....	119
Figura 51. Determinación de la estabilidad y flujo para dos tipos de fallos de muestras. (ASTM D6927).....	120
Figura 52. Especímenes para las pruebas de estabilidad y flujo.....	122
Figura 53. Sistema CoreLok.....	125
Figura 54. Equipo de prueba de estabilidad y flujo.....	126
Tabla 45. Gravedad específica teórica máxima para el pre diseño 2.....	127
Tabla 46. Análisis volumétrico de los especímenes para el pre diseño 2. ....	127
Tabla 47. Resultados de estabilidad del pre diseño 2. ....	127
Figura 55. Especímenes ensayados en condición inicial. ....	128
Figura 55.b. Especímenes ensayados en condición saturada. ....	128
Figura 56. Tinajas con control de temperatura para inmersión en agua. ....	129
Tabla 48. Pérdida de estabilidad por inmersión en agua para el pre diseño 2. ...	130
Figura 57. Especímenes ensayados después de la inmersión en agua.....	130
Figura 58. Prueba de ebullición a pre diseño 2. ....	131
Tabla 49. Desprendimiento por ebullición para el pre diseño 2.....	132
Figura 59. Partículas después la prueba de ebullición. ....	132
Figura 60. Canastilla y muestra para prueba de drene. ....	133
Tabla 50. Porcentaje de drene para mezcla pre diseño 2. ....	134

Figura 61. Resultado de la prueba al pre diseño 2, 10 °C arriba de la temperatura de premezclado.....	135
Tabla 51. Pruebas de aceptación de la mezcla densa.....	135
Tabla 52. Análisis volumétrico de la granulometría densa en base al pre diseño 2. ....	136
Tabla 53. Prueba de estabilidad a la mezcla densa en base al pre diseño 2.....	136
Figura 62. Prueba de trabajabilidad a la mezcla densa.....	136
Figura 63. Prueba de raveling a la mezcla densa. ....	137
Figura 64. Ensaye de estabilidad inicial (seca) de la mezcla densa.....	137
Figura 65. Ensaye de estabilidad satura en mezcla densa. ....	137
Tabla 54. Evaluación de agregados pétreos, banco Tonalá. ....	139
Figura 66. Gráfica de granulometría gruesa, 60% agregado grueso 40% agregado fino, banco Tonalá.....	140
Figura 67. Gráfica de granulometría fina, 60% agregado grueso 40% agregado fino, banco Tonalá.....	141
Figura 68. Gráfica de granulometría intermedia, 60% agregado grueso 40% agregado fino, banco Tonalá.....	141
Tabla 55. Porcentajes de material que pasa para control de la propuesta granulométrica 60%Grueso-40%Fino. ....	142
Figura 69. Gráfica de granulometría densa 60%Grueso-40%Fino, banco la Letra. ....	143
Figura 70. Análisis de la trabajabilidad después del almacenamiento, Prototipo 1. ....	144
Figura 71. Análisis de la trabajabilidad después del almacenamiento, Prototipo 2. ....	144
Tabla 56. Resultado de Raveling. ....	146
Tabla 57. Desempeño del Prototipo 2 de asfalto aditivado en granulometría gruesa (Pre diseño 2).....	149

## Índice de ecuaciones.

ec 1 Cálculo del Peso volumétrico Seco Suelto. ....	77
ec 2. Densidad relativa del grueso .....	87
ec 3. Densidad relativa aparente del grueso. ....	87
ec 4. Porcentaje de absorción del grueso. ....	87
ec 5. Densidad relativa del fino. ....	89
ec 6. Densidad relativa aparente del fino. ....	89
ec 7. Porcentaje de absorción del fino. ....	90
ec 8. Desgaste de los Ángeles. ....	96
ec 9. Desgaste Microdeval. ....	98
ec 10. Equivalente de arena. ....	100
ec 11. Angularidad del agregado fino, banco Tonalá. ....	104
ec 12. Raveling.....	117
ec 13. Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada. ....	122
ec 14. Gravedad específica máxima. ....	123
ec 15. Porcentaje de absorción del espécimen. ....	124
ec 16. Gravedad específica neta.....	124
ec 17. Pérdida de estabilidad por inmersión en agua.....	129
ec 18. Porcentaje de muestra que se drena.....	134

## Resumen

En este documento se presenta el uso de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas en frío de bacheo, tecnología que permite a la conservación vial en los pavimentos simplificar el proceso de elaboración y aplicación de las técnicas existentes de bacheo, lo que conduce a llevar a cabo un análisis del comportamiento de la mezcla para garantizar la calidad y desempeño apropiado en campo.

Parte del estudio es definir a los pavimentos flexibles, la función que tienen y su estructuración, enfocándose en la capa de rodadura asfáltica; además de los deterioros que pueden llegar a presentar y las acciones de conservación que se pueden llevar a cabo para contrarrestar los problemas que interfieren con los objetivos del pavimento.

Para la elaboración y el diseño de las mezclas para bacheo antes mencionadas, que emplea el uso de asfaltos aditivados, es necesario explicar las características de la mezcla fría para bacheo y de los materiales requeridos para su elaboración.

Como punto primordial se debe garantizar la calidad de la mezcla de bacheo, por lo que se establecen diferentes ensayos de laboratorio que analizan el desempeño de la mezcla para asegurar que el diseño cumpla con las características y el buen comportamiento esperado, como lo es una mezcla durable, estable y con una buena trabajabilidad.

Palabras clave: Bacheo, asfalto aditivado, pavimento flexible, trabajabilidad, mezcla.

## **Abstract**

This document will present the use of asphalt additives for the preparation of cold mixtures for potholes on the road. This technology allows the road conservation in pavements, simplify the process and application of existent technics on potholes, which it will direct to an analysis of the behavior of the mixture for guarantees quality and performance in the field.

Part of the study is to define the flexible pavements, the function that they have and their structuration, focusing on the asphalt tread; also, the damages that can emerge and the conservation measures to counteract problems that interfere with the pavement objectives.

For the elaboration and the design of the mixtures for potholes mention before, that uses asphalt additives, is necessary to explain the characteristics of cold mixtures for potholes and the required materials for its elaboration.

As the primal point, it must guarantee the quality of the mixture for potholes, that is why there are different laboratory tests that analyze the performance of the mixture to ensure that the design fulfills the characteristics and the expected behavior, as a durable, stable and workable mixture should be.

## Introducción

La conservación vial en los últimos años se ha convertido en una actividad cada vez más solicitada, debido a las malas condiciones de los pavimentos y caminos actualmente en nuestro país, ya sea a causa del desgaste de los pavimentos que han alcanzado su vida de servicio, una mala calidad en el diseño del pavimento o en la construcción, lo que lleva a buscar la solución a los problemas de deterioro de las vialidades.

Últimamente las mezclas asfálticas en frío se vuelven atractivas, como una alternativa al uso de las mezclas asfálticas en caliente en el área de la conservación vial, debido a la creciente necesidad de encontrar soluciones que representen una economía en las inversiones, y que al mismo tiempo permitan mejorar la calidad de los trabajos y materiales.

La producción de estas mezclas implica un ahorro en el consumo de energía, así como, una reducción en la generación de vapores tóxicos y polvo. Como ventaja que presenta este tipo de mezclas está su versatilidad, pues permite utilizar una gran variedad de agregados y tipos de asfaltos; además, pueden ser utilizadas en diversas condiciones ambientales.

Para la reparación de deterioros se podrán utilizar las mezclas en frío de bacheo, seleccionando la que más se adapte a las características del deterioro. Debido a estas razones es importante profundizar en el análisis de esta tecnología, en sus posibles usos y especificaciones para poder aplicarla correctamente.

Es necesario realizar una revisión de los ensayos de laboratorio que se utilizan para el diseño y caracterización del desempeño de estas mezclas, así como para sus componentes y para la combinación entre éstos. La finalidad de esta investigación será brindar las bases para encontrar una mezcla que satisfaga las necesidades del diseño de una mezcla de bacheo adecuada.

## **Objetivos.**

El objetivo general del presente trabajo es analizar el comportamiento de mezclas de bacheo aplicadas en frío elaboradas con dos tipos de asfaltos aditivados, con diferentes tipos de granulometría y a diferentes contenidos de asfalto, para establecer el diseño de una mezcla con características idóneas para satisfacer las necesidades de la conservación vial en la actualidad.

Para cumplir con el objetivo general de este proyecto, existe la necesidad de llevar a cabo una serie de objetivos específicos, entre los que tenemos los siguientes.

Definir las funciones y objetivos de los pavimentos, para comprender la importancia de contar con una buena calidad en las vialidades, así como los materiales empleados en la elaboración de capas de rodadura de mezcla asfáltica.

Describir los problemas y deterioros que pueden presentar los pavimentos flexibles, tipos de fallas y agentes que intervienen en el deterioro de un pavimento.

Explicar los tipos de conservación de los que se dispone para contrarrestar los problemas presentes en los pavimentos, enfocados en la conservación rutinaria, como las técnicas de bacheo.

Analizar la técnica del bacheo en frío, las características y el diseño de una mezcla de bacheo con asfalto aditivado para establecer una mezcla con el desempeño adecuado a base de una serie de ensayos en laboratorio, que garantizan la calidad y buen comportamiento de la mezcla en frío para bacheo.

# Capítulo 1. Pavimentos Flexibles.

## 1.1 Definición.

Los pavimentos presentan un arreglo de capas de diferentes materiales, los cuales deben de adecuarse para soportar las acciones de las cargas del tránsito y a la acción de los agentes atmosféricos a los que van a estar sujetos

Los pavimentos se diseñan para funcionar dentro de un período de vida o más bien para un número de repeticiones de cargas esperadas, con un comportamiento previsto por el mismo diseño, es decir, al final del período o cuando las repeticiones de carga se cumplan deberá presentar un estado de fallas que el mismo diseño consideró (Gómez, 2015).

El pavimento tiene diferentes funciones:

- Proporcionar una superficie de rodamiento segura, cómoda y con características permanentes, bajo la acción de las cargas repetidas del tránsito.
- Resistir el tránsito previsto para el período de diseño y distribuir los esfuerzos producidos por el tránsito hacia niveles inferiores sin que se produzcan deformaciones importantes.
- Ser una estructura que sea capaz de resistir los factores climáticos del lugar en el que es construido, principalmente asociados al agua y a temperatura, ya que son los que producen efectos más adversos en el comportamiento de los materiales que lo constituyen.

También están asociadas al pavimento características funcionales y estructurales. Cuando a los usuarios ya no les es confortable circular sobre el pavimento se dice que ha perdido funcionalidad, las estructurales están asociadas fundamentalmente a problemas de agrietamiento por fatiga, deformaciones permanentes y al fracturamiento térmico.

Respecto a las características funcionales se mencionan las siguientes:

- La resistencia al derrapamiento, que consiste en una adecuada textura en la superficie de rodamiento, la textura debe ser adecuada para las velocidades de operación vehicular.
- La regularidad transversal y longitudinal en la superficie, que afecta directamente la comodidad del usuario, dependiendo de las deformaciones presentes en el pavimento se podrá o no alcanzar la velocidad considerada en el proyecto.
- Características de reflexión luminosa, son importantes para la conducción nocturna y para el diseño apropiado de las instalaciones de iluminación.
- Drenaje superficial adecuado, para evitar que el espesor de la película de agua que escurra sobre la superficie de rodamiento sea grande y así evitar el fenómeno conocido como acuaplaneo.

Por otro lado, las características estructurales están asociadas con los aspectos mecánicos de los materiales utilizados en la construcción de las diferentes capas que conforman el pavimento, dichas características inciden en el espesor de cada capa; el análisis mecánico da una idea de los efectos producidos por las cargas del tránsito, en cuanto a estados de esfuerzo y deformaciones. De las características estructurales depende en gran medida la vida útil del pavimento (Gómez, 2015).

Las posibles capas que puede integrar un pavimento asfáltico son: Carpeta, base, subbase, subrasante, subyacente y un cuerpo de terraplén, como las mostradas en la Figura 1(Fonseca, 2011).

La carpeta o capa de rodadura es la que conforma la parte más superficial del pavimento, está sometida a la intemperie y en contacto directo a las acciones del tráfico, es por ello que está sometida a mayores exigencias, también es la que define el tipo de pavimento; principalmente se distinguen dos tipo de pavimentos: los flexibles y los rígidos, existen otros más como los semirrígidos, los mixtos o los drenantes, para fines del estudio de los asfaltos aditivados nos enfocaremos en el análisis de los pavimentos flexibles, su comportamiento, su composición y la trascendencia que tienen actualmente en el país.

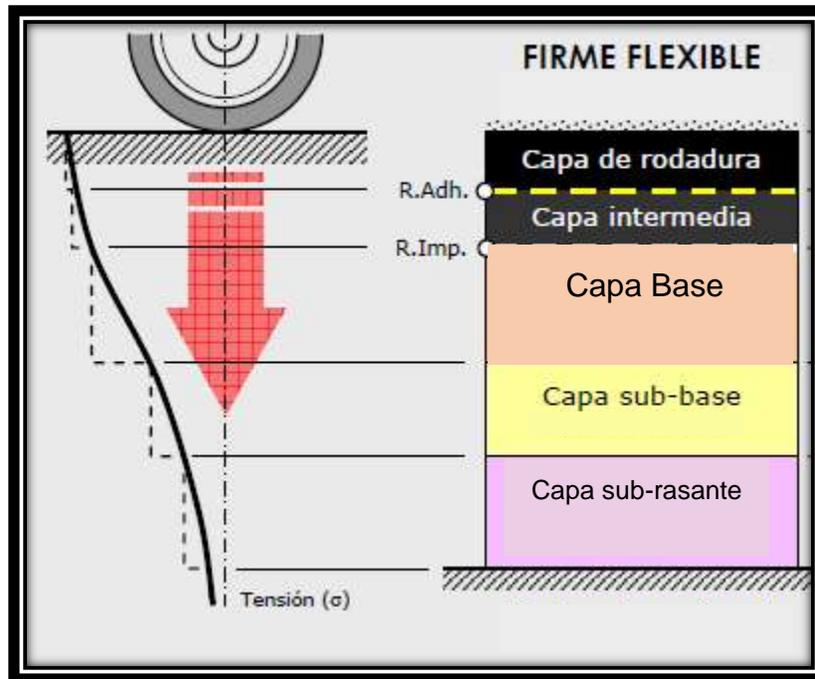


Figura 1. Esquema de la estructura multicapa de un pavimento asfáltico (Bañón y Bevia, 2000).

**Carpeta:** Es la parte que soporta directamente el tránsito vehicular y es la que se encarga de brindar las características funcionales al pavimento. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y transmite los verticales hacia las capas inferiores. Es construida con mezclas asfálticas (en frío) o de concreto asfáltico (caliente), además puede contener algún agente modificador para mejorar alguna característica, de acuerdo a la temperatura o a la intensidad pluvial de la zona en que se construya.

**Base:** Es la capa que se construye bajo la carpeta y su función es básicamente la de resistir los esfuerzos verticales que le llegan de arriba, así como distribuirlos adecuadamente hacia niveles inferiores sin que se produzcan deformaciones importantes, debe ser permeable y contar con la suficiente rigidez para no deformarse bajo las repeticiones de carga producidas por el tránsito.

**Subbase:** Es la capa construida bajo la base y sobre la subrasante, puede ser o no construida dependiendo de la capacidad de soporte de la subrasante. Su función básica es la de proporcionar una cimentación adecuada para la correcta colocación de la base, en la medida de lo posible debe tener una función drenante por que

deberá carecer de materiales finos; es la transición entre el pavimento y las terracerías.

**Subrasante:** Su función es la de recibir los esfuerzos transmitidos por las capas superiores y transmitirlos al terreno de cimentación, está conformada por suelos naturales, seleccionados o cribados producto de cortes o de la extracción de bancos.

**Subyacente:** Se construye bajo la subrasante y puede o no ser requerida. Los materiales que constituyen esta capa son suelos y fragmentos de roca, producto de cortes o de la extracción de bancos.

**Terraplén:** Su función es la de alcanzar el nivel de desplante para la construcción de la subyacente. El terraplén se construye con suelos y fragmentos de roca, producto de cortes o de la extracción de bancos, y en ningún caso deben ocuparse materiales orgánicos y/o producto de despalmes (Gómez, 2015).

Los pavimentos flexibles se caracterizan por estar constituidos por una serie de capas, las más superficiales están formadas por mezclas asfálticas, compuesta por agregados pétreos y ligantes hidrocarbonados convenientemente dosificados, lo que le da al pavimento un carácter flexible que le da el nombre. Esta capa se apoyan sobre las capas granulares.

## 1.2 Agregados pétreos.

Los materiales pétreos se definen como un conjunto de partículas minerales de distintos tamaños y formas que proceden de la fragmentación natural o artificial de las rocas. También conocido como material granular o roca, es cualquier material mineral duro e inerte que puede ser usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de la mezcla asfáltica de un pavimento. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de trituración. Por lo general el agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso de la mayoría de las estructuras de un pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado proporciona la mayoría de las características de capacidad de la mezcla.

Aunque los agregados pétreos suelen considerarse como partículas discretas y de naturaleza inerte, hay que tener en cuenta que pueden reaccionar en contacto con el agua y sus productos en disolución, o con los ligantes empleados en la elaboración de la mezcla (Bañon, et. al., 2000).

Pueden establecerse diferentes criterios de clasificación de los materiales pétreos, como lo es su procedencia mineralógica, procedencia o tamaño de sus partículas, como lo desarrolla la Figura 2.

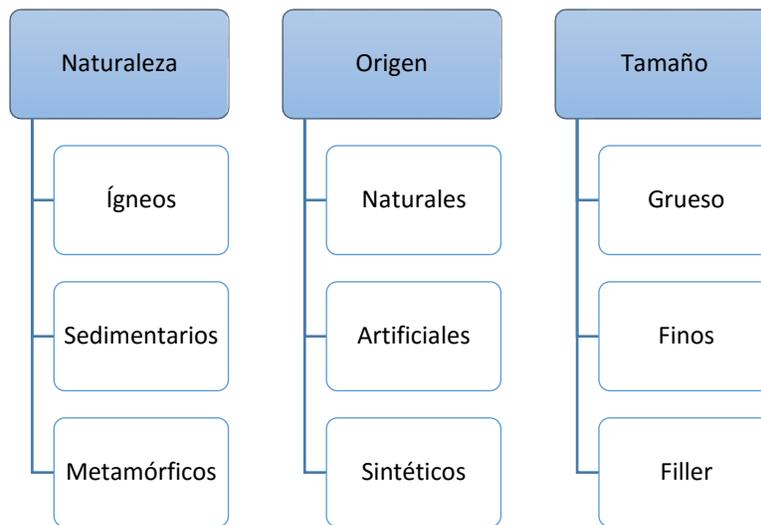


Figura 2. Clasificación de los materiales pétreos.

## 1.2.1 Clasificación por naturaleza.

### 1.2.1.1 *Sedimentarias*

De origen químico formados al menos con un 50% de carbonato de calcio. Producto de la transportación debido a la acción del agua o el viento depositada en capas. Presenta buena resistencia mecánica y su dureza es muy buena, sin embargo su resistencia al pulimiento es baja. Algunos ejemplos son las calizas, cuarcitas, areniscas, pedernal, etc. Tienen una buena adhesividad con el asfalto, es difícil su proceso de trituración.

### 1.2.1.2 *Ígneas*

Producto del enfriamiento del magma, de origen volcánico, compuestas casi en su totalidad por minerales silicatos y suelen clasificarse según su contenido de sílice.

Son muy duras con alta resistencia al pulimento. Entre los tipos de rocas ígneas se pueden encontrar rocas como el granito, riolita, gabro y basalto.

### *1.2.1.3 Metamórficas*

Rocas que han cambiado (metamorfosis) por el efecto de las presiones y/o calor en la tierra. Con formas lajosas y alteradas y de un alto peso específico.

## 1.2.2 Clasificación por origen.

Existen diferentes formas de obtener materias primas para la construcción de carreteras, pudiendo establecerse una clasificación de los agregados en función de su lugar de procedencia:

### *1.2.2.1 Agregados naturales.*

Dentro de este grupo se engloban aquellos agregados que se encuentran ya triturados, pudiendo ser directamente empleados tal y como se encuentran en la naturaleza; únicamente es necesario someterlos a un proceso de selección, refinado y clasificación por tamaños. Se hallan en graveras, canteras y otro tipo de yacimientos al aire libre, por lo que su extracción es relativamente sencilla.

### *1.2.2.2 Agregados artificiales o producto de trituración.*

Obtenidos a partir de la disgregación de un macizo rocoso, empleando generalmente procedimientos de voladura con explosivos. Necesitan un mayor tratamiento que los anteriores, por lo que es necesario procesarlos en plantas trituradoras; en ellas, el material es limpiado, triturado, clasificado y almacenado.

### *1.2.2.3 Agregados pétreos sintéticos o industriales.*

Este grupo lo componen materiales de diversa índole, como productos de desecho o subproductos de procesos industriales, materiales calcinados, procedentes de la demolición y reciclado de firmes existentes o agregados pétreos manufacturados con características mejoradas.

## 1.2.3 Clasificación por tamaño.

Los productos obtenidos a lo largo del proceso de extracción y tratamiento de agregados son separados y clasificados por tamaños para su posterior dosificación,

mezcla y empleo en las diferentes capas del firme. Se distinguen tres grandes grupos de agregados pétreos en función de su granulometría y propiedades generales:

#### **1.2.3.1 Gruesos.**

Están compuestos fundamentalmente por gravas. Este tipo de agregados presentan tamaños comprendidos entre 60 y 5 mm y conforman el esqueleto mineral en cualquier tipo de base o mezcla asfáltica.

#### **1.2.3.2 Finos.**

Se corresponden con las arenas, por lo que se excluyen aquellas partículas que no atraviesen el tamiz No. 4 (4.75 mm). Generalmente se emplean como arena del agregado grueso, de forma que ocupen los huecos existentes, para hacer la mezcla más compacta.

#### **1.2.3.3 Filler.**

Se define como la fracción mineral que pasa por el tamiz 0.075 (malla No. 200); esta especie de polvo fino se obtiene como un producto residual procedente del lavado de los agregados pétreos triturados. Dada su gran superficie específica, desempeña un papel fundamental en las mezclas asfálticas, mejorando en ciertos casos sus propiedades reológicas.

### **1.3 Asfalto.**

En la industria petrolera existe una producción muy variada del residuo del proceso de destilación del crudo, conocido como cemento asfáltico, material bastante empleado en la construcción de pavimentos en el sector carretero (Fonseca, 2011).

El asfalto es un material negro, cementante que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido a temperaturas ambientales normales.

Cuando se calienta lo suficiente el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual permite su manejabilidad. El asfalto cambia cuando es calentado y/o envejecido. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder capacidad de adherirse a las partículas de agregados.

El comportamiento del asfalto depende de la temperatura y el tiempo de carga. En la Figura 3 se muestra que el comportamiento del flujo del asfalto puede ser el mismo en una hora a 60°C que en 10 horas a 25°C.

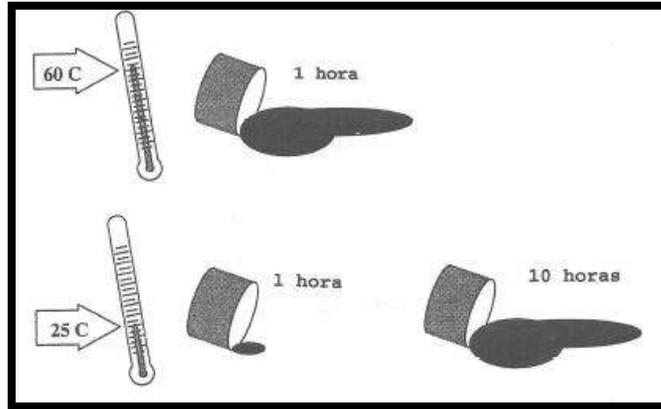


Figura 3. Comportamiento del flujo del cemento asfáltico (McGennis, 1994).

A altas temperaturas o bajo cargas sostenidas el asfalto actúa como un líquido viscoso y fluye. Mientras que a bajas temperaturas o bajo cargas muy rápidas el asfalto se comporta como un sólido elástico, se deforma al ser cargado y recupera su forma original al ser descargados, la deformación elástica se recupera completamente (McGennis, 1994).

### 1.3.1 Composición y procedencia del cemento asfáltico.

Uno de los componentes de las mezclas asfálticas que juega un rol muy importante en el comportamiento de las mismas es el cemento asfáltico; tanto su contenido en la mezcla, su procedencia y su proceso de destilación son aspectos que definen el comportamiento que las mezclas asfálticas fabricadas con estos materiales tendrán en campo bajo servicio. Los materiales asfálticos existentes en la naturaleza pueden ser divididos en dos grupos: los **naturales** y los productos **manufacturados**.

Los primeros son materiales que existen en forma natural y no han necesitado de ningún proceso de destilación, han aflorado a la superficie a través de los mantos rocosos.

Los segundos, materiales asfálticos manufacturados, son productos o residuos de un proceso de destilación del petróleo. Desde el punto de vista químico son mezclas

complejas de hidrocarburos que a su vez contienen moléculas de azufre, plomo, oxígeno, nitrógeno, etc. Las proporciones de cada uno de estos compuestos influyen mucho en las **características reológicas** de los cementos asfálticos y el que tengan más o menos de uno de estos compuestos depende de dos factores importantes: la procedencia del crudo y del proceso de destilación del mismo. Las fracciones que forman el asfalto son las mostradas en la Figura 4:

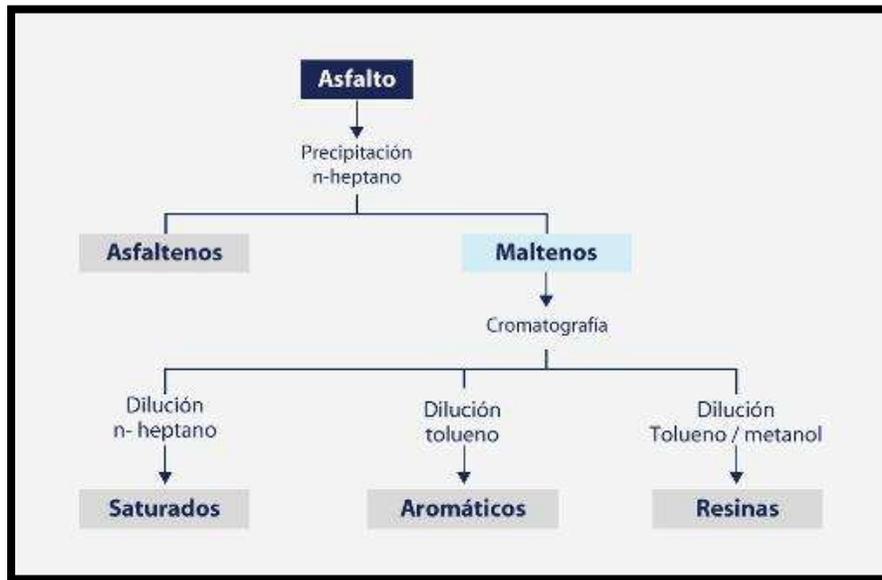


Figura 4. Composición del Asfalto. Fuente: REPSOL Físicoquímica del Asfalto

- Asfaltenos: son sólidos, se consideran la estructura del asfalto. son una familia de compuestos químicos orgánicos, resultan de la destilación fraccionada del petróleo crudo y representan los compuestos más pesados y por tanto, los de mayor punto de ebullición.
- Maltenos: son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición.
- Aromáticos: son sólidos o pastosos a temperatura ambiente. Están relacionados con la ductilidad y contribuyen al envejecimiento.
- Resinas: son líquidos a temperatura ambiente. Reblandecen y envejecen el asfalto
- Aceites saturados: son líquidos a temperatura ambiente. No cambian con el tiempo y afectan a la susceptibilidad térmica.

A pesar de la fácil explotación y excelente calidad del asfalto natural, al obtenerse en las refinerías petroleras como subproducto sólido en el craqueo (proceso químico industrial de tratamiento de los productos procedentes de la destilación fraccionada del petróleo) o fragmentación que se produce en las torres de destilación (Figura 5), resulta mucho más económica su obtención de este modo. Los asfaltos más utilizados en el mundo son los derivados de petróleo que se obtienen por este medio. Representan más del 90 % de la producción total de asfaltos (Fonseca, 2011).

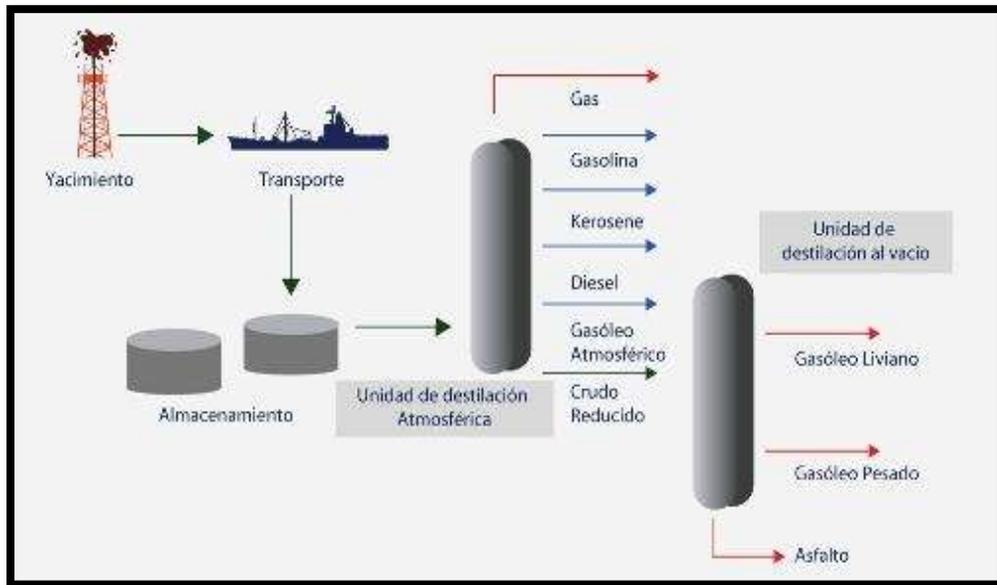


Figura 5. Proceso de destilación del petróleo (Fuente: Web/Propiedades de Materiales de Construcción).

### 1.3.2 Tipos de asfalto.

Dentro de los ligantes derivados del petróleo, se considera los tipos de ligantes en función del procedimiento de elaboración y los productos añadidos, algunos son:

#### 1.3.2.1 Asfaltos para pavimentación

Tipo de asfalto empleado para la fabricación de mezclas asfálticas usado básicamente en construcción y mantenimiento de firmes.

### ***1.3.2.2 Asfaltos fluidificados o “cut back”***

Se obtienen por disolución de los mismos en un aceite o fluidificante, teniendo por lo tanto una viscosidad reducida, se desarrollaron para facilitar el empleo de los asfaltos cuando las temperaturas o el tipo de tratamiento exigen viscosidades de aplicación menores que la que aun calentando fuertemente, puedan tener los asfaltos normalmente. Su viscosidad ha sido reducida por la adición de un fluidificador volátil.

El fluidificante por lo general, no es más que un aditivo, que se elimina posteriormente por evaporación y que sirve para facilitar la puesta en obra, quedando al último el asfalto puramente.

Debe tenerse en cuenta que durante el proceso de evaporación del fluidificante o curado se pierde un producto de alto valor, además de suponer una fuente de contaminación atmosférica y un riesgo añadido de combustión accidental dado el carácter inflamable de este tipo de productos.

Actualmente los asfaltos fluidificados tienen un escaso empleo y un consumo muy limitado (Bañon, et. al., 2000).

### ***1.3.2.3 Asfaltos fluxados***

Se definen como los productos resultantes de la incorporación a un cemento asfáltico de fracciones líquidas, más o menos volátiles, procedentes de la destilación del alquitrán. En este tipo de asfaltos, el elemento fluxante es un derivado de la hulla o alquitrán a diferencia de los fluidificados, donde el fluidificante tenía un origen derivado del petróleo.

Este tipo de asfaltos se utilizan en algunas aplicaciones muy específicas, como los tratamientos superficiales.

### ***1.3.2.4 Asfaltos modificados***

Aunque con los productos ya vistos se cubren la práctica totalidad de necesidades que pueden surgir en la construcción de carreteras, existen situaciones en las que el ligante debe ofrecer una mejor respuesta: grandes cargas de tráfico, condiciones externas agresivas, gran variabilidad térmica, etc.

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

Es un asfalto al cual se le ha añadido de manera homogénea y estable, en un cierto porcentaje previamente analizado, algún tipo de aditivo, para mejorar sus propiedades reológicas.

El asfalto es un material como se sabe es muy susceptible a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento por intemperismo, es afectado por la oxidación y la foto degradación. Sus propiedades mecánicas son muy pobres: es quebradizo a bajas temperaturas y fluye un poco arriba de la temperatura del medioambiente, además de tener una baja recuperación elástica, lo que limita ampliamente su rango de utilidad.

Por estas razones el material asfáltico en ocasiones tiene que ser modificado mediante la adición de un agente químico para mejorar sustancialmente sus propiedades reológicas, es decir, que mejoren su comportamiento mecánico para una amplia gama de condiciones de temperatura o de aplicación de las cargas.

El primer aditivo del que se tiene constancia de su aplicación en firmes fue el látex, empleado en la construcción de una carretera en Francia en el año 1902.

Actualmente, los aditivos empleados son de muy diversa naturaleza, consiguiendo cada uno de ellos mejoras en ciertas propiedades de la mezcla; los más extendidos son los polímeros, que se dividen en plastómeros y elastómeros termoplásticos. También se emplean fibras naturales, asfaltos, caucho, azufre, etc. Como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Aditivos para modificar asfaltos.

TIPO DE ADITIVO		EJEMPLOS
<b>POLÍMEROS</b>	Plastómeros	Etileno-acetato de vinilo (EVA) Etileno-acetato de metilo (EMA) Poli etileno (PE) Polipropileno (PP) Poli estireno (PS)
	Elastómeros termoplásticos	Estireno-butadieno-estireno (SBS) Estireno-butadieno (SBR) EPDM PBD
<b>FIBRAS</b>		Amianto Celulosa Fibras acrílicas
<b>OTROS PRODUCTOS</b>		Asfaltos naturales Caucho natural o reciclado Azufre

La inclusión de polímeros aumenta el coste inicial del ligante, llegando a alcanzar hasta el doble de valor que otro convencional. Sin embargo, este sobre coste queda ampliamente compensado a lo largo de la vida útil de la carretera, dado que este tipo de ligantes reduce las operaciones de mantenimiento y alarga la vida de servicio del pavimento. Además, con los ligantes modificados pueden ejecutarse capas de menores espesores que las ordinarias obteniendo unas prestaciones equivalentes, además de una reducción de costes.

#### 1.3.2.5 Emulsión de Asfalto

Una emulsión en la cual la fase dispersa es asfalto y la fase continua es agua o una solución acuosa.

Al igual que la fluidificación, la emulsión tiene por objeto facilitar la puesta en obra del asfalto, e incluso poder trabajar con él en condiciones meteorológicas adversas,

como la lluvia o el frío, aunque no es lo más recomendable. Esto se hace posible gracias a que las emulsiones bituminosas son productos líquidos a temperatura ambiente, con una viscosidad tan reducida que no suelen necesitar ningún tipo de calentamiento.

Un factor importante en este tipo de productos es la **rotura**, que se da cuando las partículas de asfalto se vuelven a juntar, segregándose del agua y constituyendo una película bituminosa continua. Visualmente es fácil de determinar este instante, ya que la mezcla pasa de color marrón a negro.

Este proceso no debe confundirse con el de curado de los betunes fluidificados.

La cinética de rotura de una emulsión, es decir, la velocidad en que este proceso se produce, se rige por diversos factores:

- El tipo de emulsión empleada: catiónica o aniónica. En las primeras, la rotura es mucho más rápida, ya que se produce repentinamente por la atracción química de las partículas de asfalto con la superficie del agregado. En las aniónicas, la evaporación del agua es el factor que controla la cinética de reacción.
- La naturaleza del agregado, ya que su contenido en sílice determinará el inicio del proceso de rotura en emulsiones de tipo catiónico.
- La temperatura exterior y la presencia de viento, causantes de la rápida evaporación del agua (Bañon, et. al., 2000).

### 1.3.3 Clasificación de los cementos asfálticos.

De acuerdo con la norma de la SCT N-CMT-4-05-001 y el manual M-MMP-05-002 los cementos asfálticos se pueden clasificar según su viscosidad dinámica a 60 °C, se determina la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a 60°C, consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 20 ml de material por probar a través de un tubo capilar al vacío, bajo condiciones de presión y temperaturas preestablecidas, la clasificación se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de asfaltos por su viscosidad dinámica a 60°C.

Clasificación	Viscosidad a 60°C Pa*s (Poisés)
AC-5	50 ± 10 (500±100)
AC-10	100 ± 20 (1000 ± 200)
AC-20	200 ± 40 (2000 ± 400)
AC-30	300 ± 60 (3000 ± 600)

#### 1.3.4 Características y propiedades del asfalto.

Algunas de las cualidades que los hacen tan apreciables en el campo de la construcción y mantenimiento de las vías de comunicación son:

Su poder aglomerante que adhiere y envuelve a los materiales pétreos y granulares al bajar su viscosidad con altas temperaturas, después ésta aumenta al enfriarse y se aumenta la superficie de contacto entre las partículas con la compactación, dando lugar a una mezcla asfáltica de características particulares.

Funciona además como estabilizante que permiten dar dureza, cohesión y resistencia a los materiales granulares sueltos, la diferencia con otros estabilizantes es que pueden asumir pequeñas deformaciones por largos periodos de tiempo permitiendo adaptarse a los pequeños asentos y deformaciones que experimenta las capas inferiores del pavimento.

Los ligantes asfálticos también recubren a los materiales granulares a través de una capa impermeable haciendo inaccesible el paso del agua.

A continuación se mencionan algunas de las propiedades a considerar en el asfalto:

- **Densidad:** La densidad relativa de un ligante es la razón entre el peso de un determinado volumen de ligante y el peso de un volumen igual de agua a una

determinada temperatura, por ejemplo 25 °C. Su conocimiento permite pasar de pesos a volúmenes o viceversa. Los asfaltos tienen una densidad relativa a 25 grados Centígrados del orden de 1.03.

- **Penetración:** es una medida de la consistencia del producto asfáltico, que se determina midiendo en décimas de milímetro, la longitud de una aguja normalizada que entra en una muestra en unas condiciones especificadas de tiempo, temperatura y carga.
- **Viscosidad:** es la relación entre la fuerza aplicada a un fluido y la velocidad con la que fluye. Por lo tanto la viscosidad de un ligante es una de sus características esenciales desde el punto de vista de su comportamiento en el momento de su aplicación cuando su consistencia es suficientemente reducida. La viscosidad de los ligantes hidrocarbonatos depende de la temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una buena idea de cuál es su susceptibilidad térmica.
- **Susceptibilidad térmica:** es la aptitud que presenta para variar su viscosidad en función de la temperatura. Es muy importante la susceptibilidad debido a que se puede conocer la temperatura adecuada para que el producto asfáltico adquiera la viscosidad requerida para el uso que le daremos.
- **Ductilidad:** se mide por el alargamiento. Los materiales asfálticos están sometidos frecuentemente a variaciones de temperatura que le provocan cambios dimensionales, para esto es necesario que el material asfáltico tenga suficiente ductilidad para alargarse sin que se produzcan grietas. Una ductilidad excesiva tampoco es conveniente debido a que se corre el riesgo de que presenten ondulaciones por efectos de las cargas del tráfico cuando crece la temperatura, y para materiales distintos, pero del mismo tipo, la ductilidad aumenta cuando la penetración aumenta o cuando la viscosidad disminuye.
- **Punto de Inflamación:** Es la temperatura a la cual arden los vapores del asfalto al aproximar a la superficie del material una llama de prueba. Cuando comprobemos que el punto de inflamación está 25 o 30 grados centígrados

por encima de la temperatura a la que manejamos el asfalto para su utilización en la obra, procederemos a estas operaciones con notables precauciones. El punto de inflamación de un asfalto debe de estar alrededor de los 215 grados centígrados.

- **Cohesión:** esta propiedad indica la dificultad de un producto asfáltico o de una mezcla de un producto asfáltico y un agregado pétreo para romperse por tracción sin que falle la adherencia entre el producto asfáltico y el agregado pétreo.
- **Adherencia** está representada como la resistencia que presenta a despegarse un producto asfáltico de un agregado pétreo.
- **Envejecimiento:** El asfalto está compuesto por moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del aire oxidándose lo que les hace más duros y frágiles. Este envejecimiento oxidativo se produce de forma muy lenta cuando el asfalto está en el firme, aunque este proceso es más rápido cuando las temperaturas a las que se ve sometido son mayores. Se debe tener en cuenta también que gran parte de este envejecimiento o endurecimiento oxidativo tiene lugar antes de que el asfalto esté compactado, durante el proceso de mezcla en el que el ligante está sometido a altas temperaturas y en forma de película fina sobre la superficie del ligante, lo que hace que el proceso sea más rápido, pudiéndose producir en este período otros tipos de envejecimiento, como la pérdida de los componentes más volátiles del asfalto, que se traduce en un endurecimiento del mismo.

Los productos asfálticos son colocados en obra en un estado plástico, pero con el tiempo se van endureciendo y se producen entonces un aumento de la cohesión al mismo tiempo que crecen la viscosidad y la dureza.

Entonces el producto asfáltico se vuelve frágil y es muy sensible a los esfuerzos bruscamente aplicados (Padilla, 2004).

## 1.4 Condiciones de los pavimentos en México.

La red carretera nacional, comunica a casi todas las regiones y comunidades del país a través de más de 333 mil kilómetros de caminos de todos tipos. Por su

importancia y características, la red carretera mexicana se clasifica en: red federal, redes estatales, caminos rurales y brechas mejoradas.

**La red federal** de carreteras es atendida en su totalidad por el gobierno federal. Registra la mayor parte de los desplazamientos de pasajeros y carga entre ciudades y canaliza los recorridos de largo itinerario, los relacionados con el comercio exterior y los producidos por los sectores más dinámicos de la economía nacional. **Las redes estatales** cumplen una función de gran relevancia para la comunicación regional, para enlazar las zonas de producción agrícola y ganadera y para asegurar la integración de extensas áreas en diversas regiones del país. Por su parte, los **caminos rurales y las brechas** mejoradas son vías modestas y en general no pavimentadas; su valor es más social que económico, pues proporcionan acceso a comunidades pequeñas que de otra manera estarían aisladas. Sin embargo, su efecto en las actividades y la calidad de vida de esas mismas comunidades es de gran trascendencia.

Si bien la red carretera posee una importancia de primer orden para nuestro país, que se destaca en el mundo por su vocación caminera, tanto la vastedad del territorio nacional como las crónicas limitaciones presupuestales que ha padecido y otros factores inciden en una u otra medida en el hecho de que México posea una densidad carretera (es decir, la longitud de carreteras por kilómetro cuadrado de territorio) relativamente baja, como lo ilustra la Tabla 3.

Tabla 3. Comparativo de Densidad Carretera.

Comparativo internacional de densidad carretera (km de carreteras por km <sup>2</sup> de territorio)						
México	Estados Unidos	Francia	Alemania	Italia	Japón	Reino Unido
0.14	0.64	1.62	1.77	1.04	3.04	1.61

Para finales del año 2000, la red carretera nacional tenía una longitud total de 333 mil 247.1 kilómetros, de los que 106 mil 571.5 corresponden a carreteras libres, 5

mil 933.1 a autopistas de cuota, 160 mil 185.1 a caminos rurales y alimentadores y 60 mil 557.4 a brechas.

Del total de kilómetros en servicio, 107 mil 822.4 están pavimentados, 145 mil 350 corresponden a carreteras revestidas, 19 mil 517.3 son de terracerías y 60 mil 557.4 son brechas. Entre los caminos pavimentados, una longitud de 9 mil 872.6 kilómetros (9.2 por ciento del total) tiene cuatro o más carriles.

Los principales aspectos de la problemática de la red federal de carreteras son el deficiente estado físico en que se encuentra, las limitaciones geométricas y de capacidad de una longitud importante de los corredores que constituyen sus tramos más utilizados, la todavía insuficiente cobertura, el mal estado de los caminos rurales y la necesidad de consolidar el funcionamiento del sistema nacional de autopistas de cuota, tanto en lo que se refiere a sus aspectos financieros como a cuestiones operativas y de conservación.

En la actualidad, las condiciones físicas en que se encuentra la red federal de carreteras se clasifican de esta manera:

- 25 %, buenas
- 35 %, regulares
- 40 %, malas.

Considerando los volúmenes de tránsito que utilizan la red de carreteras federales y las especificaciones con las que cuenta, se observa que en promedio, el 60 por ciento de su longitud funciona en condiciones que oscilan entre buenas y óptimas. Por otro lado, un 30 por ciento presenta condiciones regulares en términos de capacidad y alrededor de 10 por ciento opera cerca de la saturación. En esos tramos se presentan problemas de congestión y los costos de operación de los vehículos resultan más elevados que en el resto.

En materia de caminos rurales, el país cuenta con una red de 160 mil 185.1 kilómetros y comunica a 19 mil comunidades en las que habitan 14 millones de personas, es decir, el 60 por ciento de la población rural nacional. Esta red está compuesta por caminos de bajas especificaciones, que son transitables en toda

época del año y desempeñan un papel fundamental en la comunicación e integración permanentes de las comunidades a las que sirven.

En la actualidad, el estado físico de la red de caminos rurales es bueno en el 11 por ciento de su longitud total, regular en el 27 por ciento y malo en el 62 por ciento.

Es necesario señalar que la infraestructura carretera del país es más bien antigua y que aproximadamente sólo el 15 % tiene menos de 15 años de funcionamiento y más del 57 % con más de 30 años de vida.

Lo anterior es importante si se considera que el diseño para las carreteras que cuentan con más de 30 años de existencia, difiere del criterio del diseño actual, ya que las cargas de diseño de hace más de 30 años no corresponden a las necesidades actuales (Gómez, 2015).

Análogamente y según los mismos estudios, si el estado superficial de un pavimento pasa de lo que se considerara un estado “óptimo” a otro calificado de “bueno”, el costo de operación por kilómetro recorrido, puede aumentar de un 15 a un 20% y, si el estado superficial llegara a “malo”, este factor de incremento podría ser de 35 ó 40% (Rico, 1998).

Debe mencionarse que los pavimentos existentes son principalmente de tipo flexible, aunque existen alrededor de unos mil kilómetros de carreteras con pavimento rígido. Por lo que respecta a la infraestructura vial urbana, es importante señalar que en términos generales es deficiente.

En la actualidad los usuarios exigen cada vez mayor calidad de los pavimentos, lo cual hace obsoletos los estándares tradicionales y los métodos de control aplicados. En otras palabras, el concepto de calidad ha evolucionado. Se observan mejoras continuas en los materiales y productos, y se dedica mayor atención al control de los procesos (Zarate, 2003).

# Capítulo 2. Deterioros en los Pavimentos Flexibles

## 2.1 Generalidades

Se entenderá por **deterioro** de un pavimento como la serie de daños y manifestaciones superficiales de la capa de rodadura que perjudican la condición de circulación segura y confortable, y que a su vez son capaces de incrementar los costos de operación vehicular.

El deterioro de la superficie es cualquier indicación desfavorable del desempeño del pavimento o señales de falla inminente; cualquier desempeño poco satisfactorio de un pavimento se considera una falla (Osuna, 2008).

Como todas las estructuras, también los pavimentos se deforman al ser cargados, las cargas vivas del tránsito flexionan las capas de todos los tipos de pavimentos, pero al cesar estas la estructura recupera casi totalmente su posición inicial ya que los materiales que la forman son prácticamente elásticos para los estados de esfuerzos de diseño. La parte de la deformación no recuperada es acumulativa y se le llama deformación permanente y depende de los componentes plásticos o de la degradación de los materiales. A la parte de la deformación recuperable se le llama deformación elástica o temporal y depende básicamente del módulo de elasticidad de los materiales.

De hecho, los pavimentos que más se flexionan resultan por lo general con mayor daño, mientras que los que menos se flexionan bajo la acción de una carga dada, se dañan menos, este fenómeno está relacionado con la fatiga mecánica de los materiales.

Como todos los pavimentos se flexionan de manera diferente, resulta difícil definir qué tan flexible debe ser un pavimento para considerarse como tal o hasta qué punto máximo podría permitirse la flexión de un pavimento rígido para ser denominado de ese modo (Gómez, 2015).

## 2.2 Clasificación de fallas en los pavimentos flexibles.

Cuando un pavimento llega a presentar las condiciones de deterioro para los que fue diseñado se dice que ha llegado a su nivel de rechazo. En términos muy generales una falla es cualquier defecto que impida que el pavimento cumpla con sus objetivos fundamentales. Los objetivos fundamentales pueden dividirse en dos grupos, los estructurales y los funcionales u operativos (Gómez, 2015).

### 2.2.1 Falla Funcional.

Se considera una falla de tipo funcional, cuando sólo afecta la capa de rodadura de la carretera, la cual tiene una repercusión directa en las expectativas de satisfacción y seguridad de los usuarios.

Como es de esperarse, la capa de rodadura debe proporcionar una superficie cómoda, a través de una adecuada regularidad superficial; también debe ser impermeable, para evitar la infiltración del agua pluvial a las capas inferiores del pavimento; y además debe tener un coeficiente de fricción elevado para proporcionar seguridad en el frenado y el tránsito de los vehículos.

Estas características de comodidad, impermeabilidad y seguridad, deben mantenerse bajo las cargas repetidas del tráfico y las cambiantes condiciones atmosféricas, durante el tiempo de servicio previsto en el proyecto.

Los indicadores que definen la funcionalidad de la capa superior del pavimento, son:

- La regularidad superficial.
- La adherencia neumático-superficie de rodadura.
- La permeabilidad.
- El ruido por el paso del tráfico.
- Las características reflectantes.

El índice de servicio es una medida subjetiva, de la calificación del estado de servicio de la capa de rodamiento, obtenida por cuatro personas en un vehículo estándar a 80 km/hr, suponiendo un recorrido de 80 km por día, donde la calificación

entre una y otra persona, para que sea válida; no deberá diferir de 0,3' unidades y la escala que se maneja es de 0 a 5, siendo:

- 0-1 Muy malo
- 1-2 Malo
- 2-3 Regular
- 3-4 Bueno
- 4-5 Muy bueno

Tomando en cuenta que el índice de servicio se refiere únicamente a las condiciones de la superficie de rodamiento; la estructura funcional en sí, nos proporcionará un tránsito cómodo a los usuarios y una superficie de rodamiento adecuada a las necesidades de éste. En su determinación o apreciación no intervendrán factores como diseño geométrico, estado de acotamientos, señalamiento, etc.

La falla funcional en sí, consiste en deficiencias superficiales del pavimento a las que se asocian precisamente el índice de servicio (SCT, 2014).

Algunas de los principales ejemplos de estas fallas se mencionan en el esquema de la Figura 6, posteriormente se describirán de manera simple sus características.

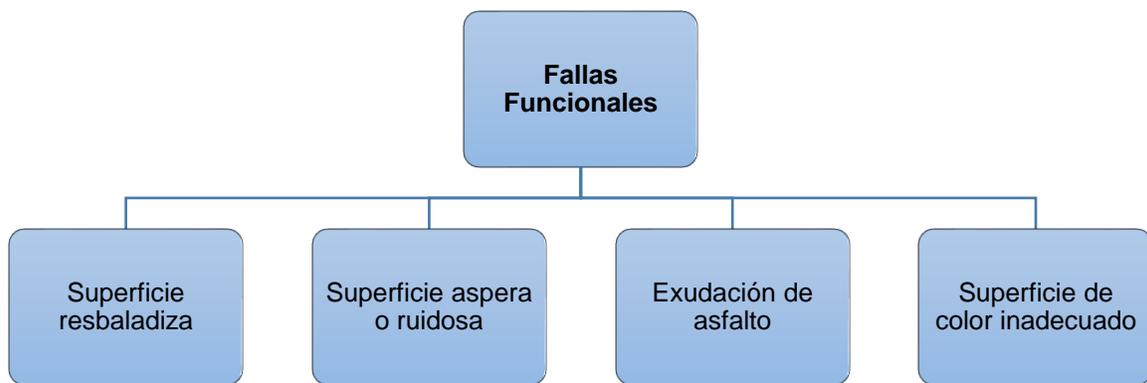


Figura 6. Esquema de fallas funcionales.

### *2.2.1.1 Superficie resbaladiza.*

Esta falla funcional es muy grave pues atañe a la seguridad, la superficie puede ser resbaladiza y provocar el derrape de los vehículos por muchas causas, como el derrame de sustancias sobre la superficie de rodamiento o la caída o arrastre de suelos y basura sobre ésta, pero la causa más común es el pulido o desgaste de los agregados expuestos que son los responsables de una textura friccionante con los neumáticos.

### *2.2.1.2 Superficie áspera o ruidosa.*

Contrario al caso anterior, el desprendimiento de agregados o la desintegración superficial de la superficie de rodamiento pueden producir vibraciones incómodas o exceso de ruido, en nuestro país no existen normas aún que limiten el ruido producido por el tráfico en una carretera, pero la incomodidad al conducir se toma en cuenta en la calificación del estado físico y también se mide la textura o acabado de la superficie de rodamiento a la cual se le asigna un rango de aceptación. Una textura demasiado áspera también puede producir desgaste excesivo de los neumáticos.

### *2.2.1.3 Exudación de asfalto.*

Esta es una falla común en todo tipo de superficies asfálticas, desde carpetas, hasta tratamientos superficiales, se caracteriza porque el asfalto de color negro y brillante aflora a la superficie, haciendo el pavimento resbaloso en esas áreas, sobre todo estando húmedas. Esta falla se presenta en forma local, es decir en áreas generalmente a lo largo de las fajas de rodaje (huellas), en la mayoría de los casos se atribuye a defectos de construcción o a un mal diseño de la mezcla (exceso de asfalto) (Gómez, 2015).

## **2.2.2 Falla Estructural.**

Se define una falla estructural, cuando el deterioro afecta total o parcialmente la estructura del pavimento. Este tipo de falla es ocasionada por deficiencias de la estructura, que es definida por el diseño del pavimento y por la calidad de los

materiales utilizados en la construcción, así como también por las condiciones de acomodo y capacidad drenante para desalojar el agua de infiltración.

Cuando se presenta una falla de tipo estructural, es necesario analizar detenidamente la forma en que el pavimento puede ser rehabilitado o reconstruido, porque las soluciones generalmente representan un mayor costo.

Para ello es importante que se determinen las características de calidad y los parámetros de desempeño de los materiales, como son la resistencia a la compresión o a la tensión, los módulos elásticos, la deformación o ahuellamiento de la mezcla asfáltica y la resistencia a la fatiga, para que en el análisis de las opciones de rehabilitación mediante los métodos de diseño aplicables, se defina una nueva estructura y los tratamientos de reutilización de los materiales existentes o los nuevos materiales que se requerirán, en el caso de una reconstrucción del pavimento.

Ejemplos de fallas estructurales son: la **deformación permanente**, el **agrietamiento por fatiga** y los baches profundos (**desintegraciones**), cuando abarcan un área notable de la superficie del pavimento, como se esquematiza la Figura 7, después mencionaremos de que trata cada una de ellas (SCT, 2014).



Figura 7. Esquema de fallas estructurales.

### 2.2.2.1 Agrietamiento por fatiga.

La fractura es una discontinuidad estructural que separa en planos generalmente verticales a la estructura, formando dos o más bloques que actúan por separado de forma más o menos independiente según lo severo del caso. Se descartan desde luego las juntas que se construyen a propósito.

Las fracturas si no son muy severas, curiosamente son bien toleradas por los usuarios, pero resultan totalmente indeseables para el pavimento pues permiten la entrada de agua y de otros agentes deletéreos a su interior, iniciándose así el principio del fin.

Según su capacidad de transmitir los esfuerzos y movimientos de un bloque a otro, las fracturas pueden ser fisuras o grietas.

- *Fisura*. Fractura del grueso de un cabello, en puntos aislados su abertura máxima no es mayor de 1.0 mm. Existe cierta capacidad de transmisión de carga y movimiento entre ellos.
- *Grieta*. Si la fractura es perfectamente visible y en la mayoría de su longitud tiene una abertura superior a un milímetro, no tendrá la habilidad para transmitir cargas o movimientos entre bloques adyacentes, o lo hará de manera poco eficaz; entonces existe una grieta.

El agrietamiento por fatiga es llamado coloquialmente “piel de cocodrilo” debido a que el patrón de espaciamiento entre las grietas es muy similar a la forma exterior de la piel del cocodrilo (Figura 8). El agrietamiento por fatiga es resultado de la aplicación de un esfuerzo de tensión mayor a la resistencia a la tensión de la mezcla.

Las fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella son un signo prematuro de agrietamiento por fatiga. Este tipo de falla, generalmente ocurre cuando el pavimento ha sido esforzado hasta el límite, por la repetición de aplicaciones de carga.



Figura 8. Pavimento asfáltico que presenta agrietamiento por fatiga (Garnica, 2005).

El agrietamiento por fatiga es comúnmente asociado con las cargas, las cuales son mucho más pesadas para la estructura del pavimento, o a que el número de repeticiones de carga fue mayor a las consideradas en el diseño.

El agrietamiento por fatiga puede conducir al desarrollo de baches cuando las piezas individuales de mezcla asfáltica se separan físicamente del material adyacente, y se desprenden de la superficie del pavimento por acción del tránsito.

Los baches generalmente ocurren cuando el agrietamiento por fatiga se encuentra en etapas muy avanzadas, o cuando se han empleado espesores de carpeta asfáltica, relativamente delgados.

En común, se considera que el agrietamiento por fatiga es más un problema estructural, que uno de materiales. Ya que es provocado por un número de factores que tienen que ocurrir simultáneamente: cargas pesadas repetidas, drenaje pobre de la subrasante, un diseño o construcción deficiente de las capas del pavimento, o que el número de cargas para el que se diseñó fue excedido (Garnica, 2005).

#### *2.2.2.2 Deformación permanente o distorsión.*

Toda pérdida de la geometría inicial de la estructura del pavimento implica deformación, pero más concretamente cuando existe cambio de volumen; tal es el caso de las deformaciones permanentes, estas se convierten en fallas cuando superan los límites que se esperan en el diseño.

La deformación permanente se puede definir como un canal longitudinal, o depresión, que se forma en las huellas debido a la compresión, movimiento lateral, o ambos, en una o más de las capas que forman el pavimento, como resultado de la aplicación de las cargas del tránsito.

En el proceso de densificación el material es empujado hacia abajo; mientras que la deformación cortante provoca que el material fluya lateralmente y hacia arriba, como se muestra en la Figura 9.

La profundidad total de la rodera es la diferencia en elevación entre la cresta y la hondonada de la superficie. Como se muestra en dicha figura, los esfuerzos de tensión sobre la superficie y el lado exterior del área cargada pueden ocasionar grietas longitudinales en el concreto asfáltico.

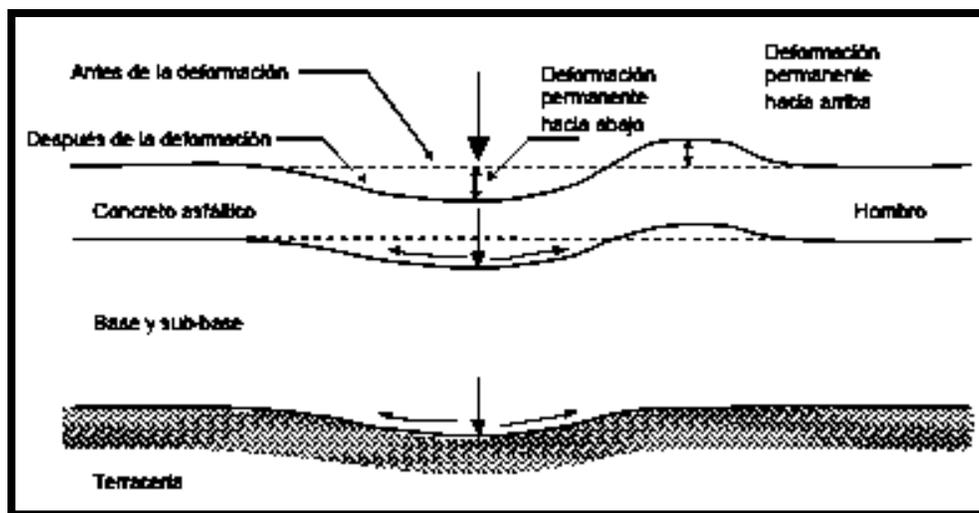


Figura 9. Mecanismo de deformación permanente en pavimentos (Garnica, 2005).

#### Tipos de deformación permanente

- Deformación plástica: Es una depresión cercana al centro de la carga aplicada, con ligeros montículos o protuberancias ubicados a los lados de la depresión. Este tipo de deformación longitudinal, generalmente se debe a un contenido insuficiente de vacíos de aire (menos del 4%) en la carpeta.

- Deformación por consolidación: Como la anterior, es una depresión cercana a la aplicación de la carga, pero sin acompañamiento de protuberancias a los lados de la depresión. Este tipo de deformación longitudinal se debe al exceso de vacíos de aire (mayores al 8%) en la carpeta, después de la compactación. Esta condición provoca que la carpeta se consolide a lo largo de las huellas que dejan las ruedas de los vehículos, especialmente durante el primer verano.
- Deformación mecánica. Es resultado de un hundimiento en la base, subbase o terracerías, acompañada por un disturbio en el patrón de agrietamiento (Garnica, 2005).

### *2.2.2.3 Desintegraciones.*

Cualquier capa de un pavimento puede deteriorarse hasta entrar en un proceso de desintegración, en el caso de los suelos estabilizados sólo mecánicamente se dice que se degradan, es frecuente encontrar suelos muy diferentes a los originales en estudios practicados después de algunos años de servicio, en alguna forma, ciertas partículas pueden desintegrarse. Este término se aplica más en carpetas de materiales asfálticos sujetas a la acción directa del tránsito y del ambiente, en donde se producen desprendimientos aislados de partículas, desprendimiento superficial de agregados o la franca desintegración de toda la capa. Aparecen así los terribles ***baches*** y las calaveras que son una forma de desintegración local (Gómez, 2015).

## 2.3 Principales agentes que deterioran los pavimentos y sus efectos.

Son varios los factores que originan las fallas de los pavimentos, los efectos que éstos causan en los principales tipos de deterioro, así como los mecanismos de evolución de estas fallas. Nos enfocaremos en los siguientes:

- La intensidad de tráfico y el peso de los vehículos.
- La presencia de agua.
- Agentes climáticos.
- Una deficiencia de calidad durante la construcción del pavimento.

### 2.3.1 Efecto de la intensidad del tráfico y del peso de los vehículos.

La intensidad, la velocidad, el tipo y peso de vehículos que transitan una carretera durante su vida de servicio, condicionan el desarrollo de fallas en el pavimento, porque producen esfuerzos dinámicos de tensión, compresión y mixtos, que son absorbidos o disipados por la capa superior asfáltica y por las capas inferiores de la estructura.

#### *2.3.1.1 Agrietamiento por fatiga de las capas superiores del pavimento.*

Los esfuerzos de tensión generalmente se presentan y son disipados en la capa superior, de tal forma que el paso sucesivo de las cargas dinámicas genera el fenómeno de fatiga en esta capa.

En el diseño de la estructura del pavimento se analiza que la falla por fatiga no ocurra durante el período de servicio del proyecto, para lo cual se considera el uso de materiales en los que se revisa en pruebas dinámicas de laboratorio que presenta una alta resistencia a la fatiga, determinando además un espesor de la capa superior que rigidice y asegure la resistencia a la fatiga para la vida de servicio del pavimento. De no tomar medidas oportunas para atender este tipo de falla, lo más probable es que el pavimento en corto tiempo sufra una desintegración

paulatina de la capa de rodadura que la vuelva intransitable o con un nivel de servicio muy bajo.

### *2.3.1.2 Deformaciones de la estructura del pavimento flexible.*

Los esfuerzos de compresión que producen las cargas de los vehículos, van generando con el tiempo deformaciones permanentes en el pavimento flexible, principalmente en las zonas de canalización del tráfico. A este tipo de deformaciones usualmente se les denomina “roderas o ahuellamiento”.

La acumulación de las deformaciones que no se recuperan en las capas del pavimento, por el paso sucesivo de los vehículos, se denomina “deformación permanente”.

Cuando un pavimento presenta una deformación permanente igual o superior a un valor determinado en el diseño, se considera que el pavimento terminó su vida de servicio y debe ser rehabilitado o reconstruido.

### **2.3.2 Efecto del agua.**

Es importante considerar que el agua es quizás el factor principal que ocasiona más daños en las carreteras, por lo que la mejor recomendación siempre será eliminar o alejar el agua de la zona donde discurre el trazo de una obra vial.

Es importante señalar que la superficie de rodadura debe ser impermeable para que el agua de lluvia pueda ser desalojada por las orillas del pavimento canalizándola hasta las obras de drenaje superficial.

Sin embargo, cuando los pavimentos flexibles presentan grietas superficiales, el agua se introduce a las capas inferiores saturando y reblandeciendo los materiales de apoyo de la capa superficial, ocasionando los efectos asociados a las fallas que se comentan a continuación.

#### *2.3.2.1 Deformaciones, agrietamientos y baches en pavimentos flexibles.*

La presencia del agua en las capas del pavimento flexible y en las terracerías de apoyo, provoca en general una disminución de la resistencia de los materiales utilizados en su construcción.

La cantidad de finos que contienen los materiales pétreos y los suelos que se utilizan en las capas intermedias del pavimento y en las terracerías, respectivamente, con la presencia del agua se ven afectados en su comportamiento mecánico y más si estos finos son de tipo arcilloso.

El porcentaje de finos y su naturaleza plástica se han limitado en las especificaciones contenidas en la Normativa SCT para México, que se están aplicando en los últimos años, con objeto de reducir el efecto del agua en la matriz fina de los materiales.

Como consecuencia, en carreteras con materiales que presentan saturación de agua en las capas hidráulicas intermedias del pavimento o también con suelos saturados en las terracerías, se presentan inicialmente deterioros en forma de deformaciones en zonas locales, luego agrietamientos dentro de las áreas deformadas y finalmente se presenta la desintegración paulatina de la estructura del pavimento. A este tipo de fallas comúnmente se les conoce como baches.

#### *2.3.2.2 Agrietamiento y pérdida de soporte por la migración de finos a la superficie de los pavimentos.*

Cuando los materiales pétreos que forman la capa de apoyo de la capa asfáltica superficial, contienen un porcentaje de finos elevado y se encuentran saturados del agua que se infiltra por las grietas o por las juntas de construcción mal selladas, con el paso constante de los vehículos pesados se presenta un fenómeno de migración de finos a través de las grietas o las juntas, hacia la superficie de rodadura, el cual se conoce en el medio de carreteras como *bombeo*.

Ocasiona posteriormente una falta de sustentación de la capa superior, provocando en los pavimentos flexibles mayor agrietamiento de la capa de rodadura y originando baches.

#### *2.3.2.3 Desprendimiento de agregados y pérdida de resistencia en capas asfálticas.*

El agua libre que tiene contacto con el material pétreo adherido con el asfalto, por la naturaleza mineralógica de los materiales pétreos, con el tiempo puede llegar a

separar el asfalto adherido, presentándose entonces un desprendimiento de partículas en la superficie de rodadura que va evolucionando hasta que en el caso más crítico puede llegar a desmoronar la capa asfáltica superficial o levantar la carpeta de riegos.

Puede llegar a disminuir la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica y por lo tanto disminuir su resistencia a los esfuerzos de tensión y compresión de las cargas de los vehículos. Es importante que se detecte en el estudio de calidad de los materiales pétreos evitar el uso de materiales que presentan mala afinidad con el asfalto o en su caso, recomendar tratamientos que reduzcan este problema, tales como obtener nuevas caras en los materiales pétreos mediante trituración o adicionar aditivos mejoradores de afinidad y adherencia.

### 2.3.3 Efecto de la temperatura y del medio ambiente.

A lo largo de su vida de servicio, el pavimento está expuesto a cambios de temperatura en el día y por los cambios de clima en el año. Los gradientes de temperatura a las que está expuesto, también varían por el lugar en el que esté ubicada la carretera, aunque por la posición geográfica de México, los efectos más perjudiciales por temperatura se tienen en las zonas más calurosas, siendo común medir temperaturas máximas en la superficie de rodadura, de hasta 70 ° C.

#### *2.3.3.1 Agrietamiento por contracción y dilatación en las capas superiores del pavimento.*

Los gradientes térmicos a los que están expuesto los pavimentos flexibles, ocasionan fenómenos de contracción y dilatación en los materiales de las capas que los constituyen, ocasionando agrietamientos transversales.

#### *2.3.3.2 Agrietamiento y envejecimiento de la capa asfáltica en pavimentos flexibles.*

Por otra parte, el medio ambiente tiene un efecto de oxidación con el consecuente endurecimiento y envejecimiento del asfalto que se encuentra en las capas y tratamientos asfálticos de los pavimentos flexibles. Esto ocasiona que con el tiempo se presente un agrietamiento en forma de mapa, así como una disminución del

comportamiento mecánico y reducción de la vida de servicio de las capas asfálticas y de las carpetas a base de riegos.

#### *2.3.3.3 Deformación permanente de capas asfálticas.*

Las altas temperaturas ocasionan en las capas asfálticas que se presenten deformaciones, sobre todo cuando se emplean asfaltos de naturaleza blanda, lo cual también puede producir desplazamientos laterales de la mezcla, por el paso del tráfico pesado. Lo recomendable, para que no suceda este deterioro, es utilizar un material asfáltico duro o un asfalto modificado con algún aditivo de tipo polimérico.

#### **2.3.4 Efecto de un control de calidad deficiente durante la construcción.**

Durante la construcción de un pavimento, es necesario efectuar un estricto control de calidad para asegurar el cumplimiento de las especificaciones contenidas en el proyecto, lo que conlleva a lograr el desempeño y la durabilidad previstos.

El control de calidad debe aplicarse desde la selección y producción de los materiales pétreos, hasta el tendido y compactación de las capas del pavimento en la obra.

##### *2.3.4.1 Desempeño deficiente y corta durabilidad del pavimento.*

Es importante que se aplique un control de calidad eficiente en la producción, almacenamiento y manejo de los materiales pétreos y asfálticos, que fueron seleccionados previamente porque cumplen con la calidad requerida para la construcción de un pavimento, para que durante la construcción se evite la contaminación con otros materiales de baja calidad, la segregación de partículas y la inadecuada dosificación de materiales.

De igual manera, el diseño de la mezcla asfáltica, debe efectuarse con las fracciones de tamaños reales disponibles en los materiales pétreos, para que pueda lograrse una granulometría que además de que cumpla con la especificación correspondiente, pueda reproducirse durante la producción de la mezcla asfáltica.

Es importante también que durante la producción de la mezcla asfáltica en caliente, se realice un control estricto de las temperaturas de materiales. De no cuidarse todos estos aspectos durante la producción de materiales, se obtendrán resistencias mecánicas inferiores a las definidas en el diseño y requeridas en el proyecto, presentándose a corto o mediano plazo algunas de las fallas antes comentadas.

#### *2.3.4.2 Desprendimiento de partículas en capas asfálticas.*

El desprendimiento de partículas que normalmente se presenta en una capa asfáltica recién construida, puede deberse a diversas causas asociadas con un control de calidad deficiente, como son: exceso de agregados gruesos en la superficie por una dosificación inadecuada en la producción de la mezcla, separación de gruesos durante el tendido (técnica común en el medio nacional), endurecimiento prematuro del asfalto por falta de control de temperatura del material pétreo, falta de cohesión para contener la fracción gruesa por falta de finos o por escasez de asfalto en la mezcla.

Desafortunadamente el desprendimiento prematuro de partículas requiere una acción inmediata para que este deterioro no se continúe desarrollando, porque de no atenderse oportunamente, con el tiempo podría originar el desgranamiento de la capa asfáltica hasta su completa desintegración.

#### *2.3.4.3 Falta de adherencia entre la capa de apoyo y la capa asfáltica de rodadura.*

Para asegurar un comportamiento integral de las capas que forman el pavimento flexible, es necesario asegurar que tanto el riego asfáltico de impregnación como el riego asfáltico de liga, para impermeabilizar y obtener una unión entre la capa de apoyo y la capa de rodadura, se efectúen en una superficie limpia sin partículas sueltas, con una dosificación uniforme y óptima o suficiente, para que no esté escasa o con exceso, porque en ambos casos se presentarán como consecuencia zonas permeables y que ambas capas no trabajen integralmente.

Una aplicación deficiente en los riegos asfálticos de impregnación o de liga, causan baja resistencia de materiales por infiltración de agua, disminución de la resistencia a la fatiga de la capa superior, corrimiento de la capa asfáltica superior o exudación superficial de asfalto.

#### *2.3.4.4 Defectos de la capa superior del pavimento durante su construcción.*

Una vez producida la mezcla asfáltica, se requiere que su traslado a la zona de construcción se realice con estricto cuidado para evitar contaminaciones, segregación de partículas y demoras para su colocación, para aprovechar las cualidades ligante s de asfalto.

También será necesario que la colocación (tendido) y el acomodo (compactación) se realicen con el equipo y los procedimientos adecuados y oportunos, para evitar acomodos defectuosos, segregación y clasificación de partículas, acabados defectuosos, etc.

En la construcción de mezclas asfálticas, los defectos comunes que se presentan, atribuibles a un control de calidad inadecuado en el tendido y compactación, son:

- Clasificación de partículas, que posteriormente provoca desprendimientos.
- Juntas de construcción abiertas, por donde se infiltra el agua de lluvia.
- Baja regularidad superficial, que no cumpla con la especificación que asegure el confort en los usuarios.
- Acabados con falta de uniformidad.
- Grados de compactación por debajo del límite mínimo especificado, que reduce el desempeño y la durabilidad de la capa.

En la Tabla 4 se engloban las causas y efectos antes mencionados, haciendo una comparación de las causas y efectos de los deterioros existentes en un pavimento flexible.

Tabla 4. Principales agentes que deterioran los pavimentos flexibles.

Agentes que Deterioran los Pavimentos y su Efecto en Ellos				
Efectos en el Pavimento	Intensidad de Tráfico	Presencia de Agua	Clima	Controles de Calidad
<i>Agrietamiento por Fatiga</i>	X	X	-	X
<i>Deformación Permanente</i>	X	X	X	X
<i>Desintegración del Pavimento</i>	X	X	-	X
<i>Migración de Finos</i>	-	X	-	X
<i>Desprendimiento de Agregados</i>	-	X	-	X
<i>Otro tipo de Agrietamiento en el Pavimento</i>	-	-	X	X
<i>Envejecimiento de la Capa Asfáltica</i>	-	-	X	X
<i>Desempeño Deficiente del Pavimento</i>	-	-	-	X
<i>Exudación del Asfalto</i>	-	-	-	X

En resumen, las fallas en los pavimentos son ocasionadas por diversos factores como son la intensidad y el tipo de tráfico, la infiltración de agua en la estructura, los agentes climáticos y un control de calidad deficiente, provocando distintos tipos de deterioro que de no atenderse con oportunidad, presentan una evolución que tienden a crecer y se extienden en toda el área del pavimento, lo que conlleva a reducir los niveles de servicio en la operación de las carreteras y a tener necesidad de aplicar medidas más costosas, conforme el daño resulte mayor (SCT, 2014).

## 2.4 Causas y niveles de severidad de las fallas en pavimentos flexibles.

A continuación se mostrarán una serie de tablas con las fallas que se pueden presentar en los pavimentos flexibles, con una breve descripción, las posibles causas y como clasificar el nivel de severidad que tiene.

Es importante comentar que sólo se presentan objetivamente algunos de los principales daños en los pavimentos flexibles, mencionados a lo largo este capítulo, dejando claro que existe otra amplia variedad de daños que se pueden presentar en los pavimentos, las cuales se pueden encontrar en catálogos de deterioros de pavimentos que existen actualmente.

La mejor forma de identificar las fallas del pavimento y determinar porqué se han producido, es mediante la conducción de un estudio de reconocimiento, en el cual se debe identificar el tipo severidad y magnitud de cada falla. También se debe tratar de determinar si el diseño del pavimento, la carga soportada, el agua, la temperatura, los materiales del pavimento o la construcción fueron la causa de la falla (Miranda y Ricardo, 2010).

Es necesario indicar que la clasificación e identificación de las fallas puede variar dependiendo del criterio de cada persona, por lo que es importante aplicar criterios de catálogos de fallas para unificar la valoración de los daños, y así definir las posibles opciones para su rehabilitación.

### 2.4.1 Deformaciones permanentes.

Tabla 5. Daño por rodadura o ahuellamiento.

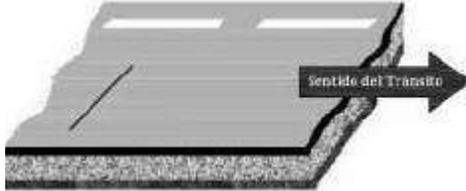
TIPO DE FALLA		Deformación longitudinal o rodadura.
<b>Descripción</b>		Se trata de una falla de tipo estructural. Deformación del perfil transversal por hundimiento en las zonas de canalización del tráfico (Rodríguez, et. al., 2004) (SCT, 2014) (Téllez, 1991).
<b>Posibles Causas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad insuficiente de la estructura del pavimento</li> <li>• Compactación o calidad deficiente de las capas</li> <li>• Uso de asfaltos blandos</li> <li>• Uso de agregados redondeados</li> <li>• Acción del tránsito y estacionamiento prolongado de vehículos pesados</li> </ul>
<b>Medición</b>		<p>La severidad del ahuellamiento se determina en función de la profundidad de la huella, la medición se efectúa donde la profundidad es mayor, promediando los resultados obtenidos a intervalos de 3 m a lo largo de la huella.</p> 
<b>Nivel de Severidad</b>		
BAJO	Menor a 10 mm	
MEDIO	Entre 10 mm y 25 mm	
ALTO	Mayor a 25 mm	

Tabla 6. Daño por corrugación.

		Ondulaciones transversales o corrugación.
<b>Descripción</b>		Falla estructural de serie de ondulaciones, constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección del tránsito, las cuales se suceden muy próximas unas de otras, a intervalos aproximadamente regulares, en general menor de 1 m entre ellas, a lo largo del pavimento (Rodríguez, et. al., 2004) (SCT, 2014) (Téllez, 1991).
<b>Posibles Causas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabilidad de la mezcla deficiente</li> <li>• Acción del tránsito intenso</li> <li>• Base de mala calidad</li> <li>• Unión deficiente entre capa asfáltica y base</li> <li>• Fuerzas tangenciales producto de aceleraciones y frenado de vehículos</li> </ul>
<b>Medición</b>		<p>La corrugación se mide en metros cuadrados, registrando su severidad al área total afectada de la sección, en base a la vibración que genera en el vehículo, a su incomodidad y/o riesgo para la circulación de éstos.</p> 
<b>Nivel de Severidad</b>		
BAJO	Sin incomodidad	
MEDIO	Cierta incomodidad	
ALTO	Incomodidad y/o riesgo	

## 2.4.2 Fisuras y agrietamientos.

Tabla 7. Daño por Agrietamiento longitudinal.

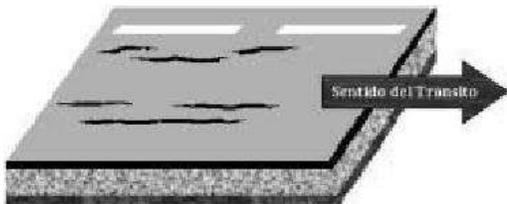
TIPO DE FALLA		Agrietamiento Longitudinal.
<b>Descripción</b>		Falla funcional por una fracturación que se extiende a través de la superficie del pavimento, paralelamente al eje de la carretera, pudiendo localizarse en las huellas de canalización de tránsito, en el eje o en los bordes del pavimento. La ubicación de la fisura es indicativa de la causa más probable (Rodríguez, et. al., 2004) (SCT, 2014) (Téllez, 1991).
<b>Posibles Causas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reflejo de las grietas en la capa base</li> <li>• Asentamiento de las capas por el tránsito</li> <li>• Espesor insuficiente</li> <li>• Contracción de materiales de la capa de rodamiento</li> <li>• Aislamientos aislados de las capas inferiores</li> <li>• Drenaje insuficiente</li> </ul>
<b>Medición</b>		<p>Las fisuras longitudinales se miden en metros lineales. Si la fisura no tiene el mismo nivel de severidad en toda su extensión, cada porción tiene un diferente nivel de severidad. En base al espesor de la fisura y la cantidad de éstas.</p> 
<b>Nivel de Severidad</b>		
BAJO	<3mm sin ramificaciones	
MEDIO	Entre 3 y 6 mm rodeada de ramificaciones	
ALTO	>6 mm con ramificaciones	

Tabla 8. Daño por Agrietamiento en bloque.

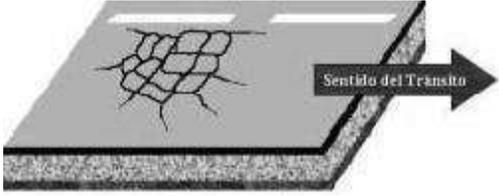
TIPO DE FALLA		Agrietamiento en bloque.
<b>Descripción</b>		Falla funcional de una serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0.10 a 9.0 m <sup>2</sup> . La fisura en bloque se presenta normalmente en una gran área del pavimento y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico (Rodríguez, et. al., 2004) (SCT, 2014) (Téllez, 1991).
<b>Posibles Causas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reflejo de las grietas en capas subyacentes</li> <li>• Cambios de volumen del agregado fino de las mezclas asfálticas con un ligante de penetración baja</li> <li>• Contracción térmica de la superficie de rodamiento</li> <li>• Envejecimiento del asfalto</li> </ul>
<b>Medición</b>		<p>Se miden en metros cuadrados de superficie afectada. Normalmente ocurre a un nivel de severidad en una sección del pavimento, pero cuando se observe diferentes niveles de severidad se miden y registran separadamente. En base al ancho promedio de la fisura y su despostillamiento.</p> 
<b>Nivel de Severidad</b>		
BAJO	Ancho promedio de 2 mm	
MEDIO	Entre 2 y 5 mm despostillamiento menor	
ALTO	>5 mm despostillamiento severo	

Tabla 9. Daño por Agrietamiento transversal.

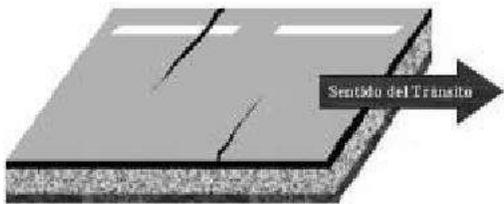
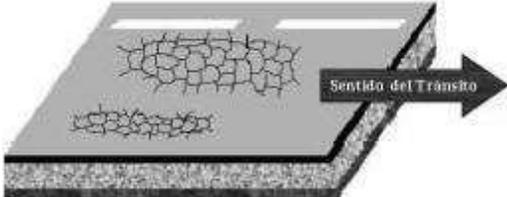
TIPO DE FALLA		Agrietamiento transversal.
<b>Descripción</b>		Falla funcional por una fracturación de longitud variable que se extiende a través de la superficie del pavimento, formando un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril como limitarse a los 0.60 m próximos al borde del pavimento (Rodríguez, et. al., 2004) (SCT, 2014) (Téllez, 1991).
<b>Posibles Causas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reflejo de las grietas en capas subyacentes</li> <li>• Acción del tránsito</li> <li>• Espesor insuficiente</li> <li>• Contracción térmica de la superficie de rodamiento</li> </ul>
<b>Medición</b>		<p>Las fisuras longitudinales se miden en metros lineales. Si la fisura no tiene el mismo nivel de severidad en toda su extensión, cada porción tiene un diferente nivel de severidad. En base al espesor de la fisura y la cantidad de éstas.</p> 
<b>Nivel de Severidad</b>		
BAJO	<3mm sin ramificaciones	
MEDIO	Entre 3 y 6 mm rodeada de ramificaciones	
ALTO	>6 mm con ramificaciones	

Tabla 10. Daño por Agrietamiento por fatiga.

TIPO DE FALLA		Agrietamiento por fatiga o Piel de cocodrilo.
<b>Descripción</b>		Falla estructural con una serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. Ocurren necesariamente en áreas sometidas al tránsito, como las huellas de canalización del tránsito. En su etapa final, el agrietamiento se transforma en bache (Rodríguez, et. al., 2004) (SCT, 2014) (Téllez, 1991).
<b>Posibles Causas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envejecimiento del asfalto</li> <li>• Fatiga de la capa asfáltica</li> <li>• Espesor inadecuado de la capa asfáltica</li> <li>• Fuertes solicitaciones del tránsito</li> <li>• Soporte inadecuado de la base</li> </ul>
<b>Medición</b>		<p>Se miden en metros cuadrados de superficie afectada. Si estas porciones pueden ser distinguidas fácilmente, una de otra, se miden y registran separadamente. Con base a su espesor, el tamaño y número de polígonos formados por las fisuras, y la condición de éstos, es decir si a penas se comienzan a formar o hasta poder remover los trozos de carpeta.</p> 
<b>Nivel de Severidad</b>		
BAJO	Fisuras menores de 2 mm, origen de polígonos	
MEDIO	Entre 2 y 5 mm polígonos pequeños	
ALTO	Malla cerrada de polígonos con desintegraciones de la carpeta	

### 2.4.3 Desintegraciones.

Tabla 11. Daño por bache.

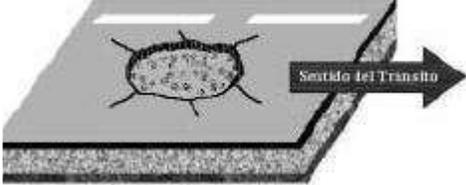
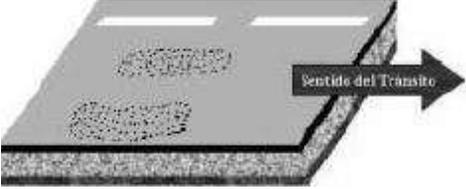
TIPO DE FALLA		Baches.
<b>Descripción</b>		Falla estructural con una desintegración total de la superficie de rodadura que puede extenderse a otras capas del pavimento, formando una cavidad de bordes y profundidades irregulares (Rodríguez, et. al., 2004) (SCT, 2014) (Téllez, 1991).
<b>Posibles Causas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espesores de capas inadecuados</li> <li>• Defectos constructivos</li> <li>• Acción abrasiva del tránsito sobre zonas donde se presenta falla por fatiga u otro tipo de daño previo</li> </ul>
<b>Medición</b>		<p>Pueden medirse alternativamente: a) Contando el número de baches y b) Computando éstos en metros cuadrados de superficie afectada. Con relación a la profundidad y a su diámetro.</p> 
<b>Nivel de Severidad</b>		
BAJO	Profundidad <2.5cm diámetro hasta 70 cm	
MEDIO	Profundidad entre 2.5 y 5 cm, diámetro entre 70 y 100 cm	
ALTO	Profundidad mayor de 5 cm y diámetro mayor a 100 cm	

Tabla 12. Desintegración de la capa de rodadura.

TIPO DE FALLA		Desintegración o peladura.
<b>Descripción</b>		Desintegración superficial de la carpeta asfáltica como consecuencia de la pérdida de ligante bituminoso y del desprendimiento del agregado pétreo, aumentando la textura del pavimento y exponiendo cada vez más los agregados a la acción del tránsito y clima (Rodríguez, et. al., 2004) (SCT, 2014) (Téllez, 1991).
<b>Posibles Causas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envejecimiento del ligante</li> <li>• Mezcla asfáltica de calidad deficiente</li> <li>• Falta de adherencia del asfalto y el agregado mineral</li> <li>• Falta de asfalto</li> </ul>
<b>Medición</b>		<p>Se miden en metros cuadrados de superficie afectada, en base a las oquedades generadas o la textura rugosa de la capa.</p> 
<b>Nivel de Severidad</b>		
BAJO	Pocas oquedades y peladuras	
MEDIO	Desprendimiento de agregados, textura abierta y rugosa	
ALTO	Textura rugosa con oquedades ente 10 mm de diámetro y 15mm de profundidad	

## **Capítulo 3. El bacheo en la conservación vial.**

### **3.1 Conservación de los pavimentos.**

Se denomina mantenimiento, o conservación de pavimentos a los trabajos constantes o periódicos que se ejecutan para evitar el deterioro o destrucción prematura de una obra y que los mantienen en su calidad y valor.

El mantenimiento sólo debe incluir trabajos, que en términos generales, estén orientados a preservar el camino para que preste un servicio adecuado, por el tiempo previsto en el diseño y bajo las condiciones de tránsito y ambientales prevalecientes. De acuerdo con ello, un camino bien diseñado y perfectamente construido sobre un terreno ideal de características homogéneas, no debería requerir más mantenimiento que el que corresponde a operaciones de conservación rutinaria y periódica. Sin embargo, claramente la situación es otra; a veces, al poco tiempo después de la puesta en servicio, comienzan a detectarse pequeñas fallas que, de no repararse en momento oportuno, llevan a colapso prematuro de sectores crecientes de la obra. Por lo tanto, la vida útil de una carretera puede prolongarse significativamente aplicando oportuna y adecuadamente las prácticas de mantenimiento disponibles en la actualidad.

Todos los pavimentos requieren de mantenimiento, para evitar fisuras, depresiones y cualquier tipo de falla que son evidencias visibles del desgaste del pavimento.

Los caminos requieren de intervenciones motivadas tanto por la obsolescencia propia de los materiales que las conforman como por fallas, generalmente puntuales, que pueden tener su origen ya sea en situaciones especiales no detectadas en el diseño o en problemas derivados de la construcción.

Estudios destinados a mejorar la eficiencia en el mantenimiento vial indican que los resultados se logran de una mejor manera cuando se aplica la técnica de mantenimiento adecuada en el momento oportuno.

Por esta razón la inspección debe realizarse frecuente y minuciosamente por personas capacitadas, para prevenir la evolución de las fallas en los pavimentos.

Lo recomendable al detectar un fuerte deterioro del pavimento, es hacer una investigación detallada para definir si son fallas funcionales o estructurales, si es éste el caso deben realizarse pozos de inspección a lo largo del área dañada, para determinar el tipo de reparación que se requiere.

El mantenimiento adecuado y oportuno de un camino requiere de un conjunto de operaciones durante la vida útil de la obra. Estos se clasifican en 3 niveles como se observa en la Figura 10, en función de las características del trabajo y periodicidad con que suelen requerirse: operación de conservación rutinaria, operación de conservación periódica y restauraciones.

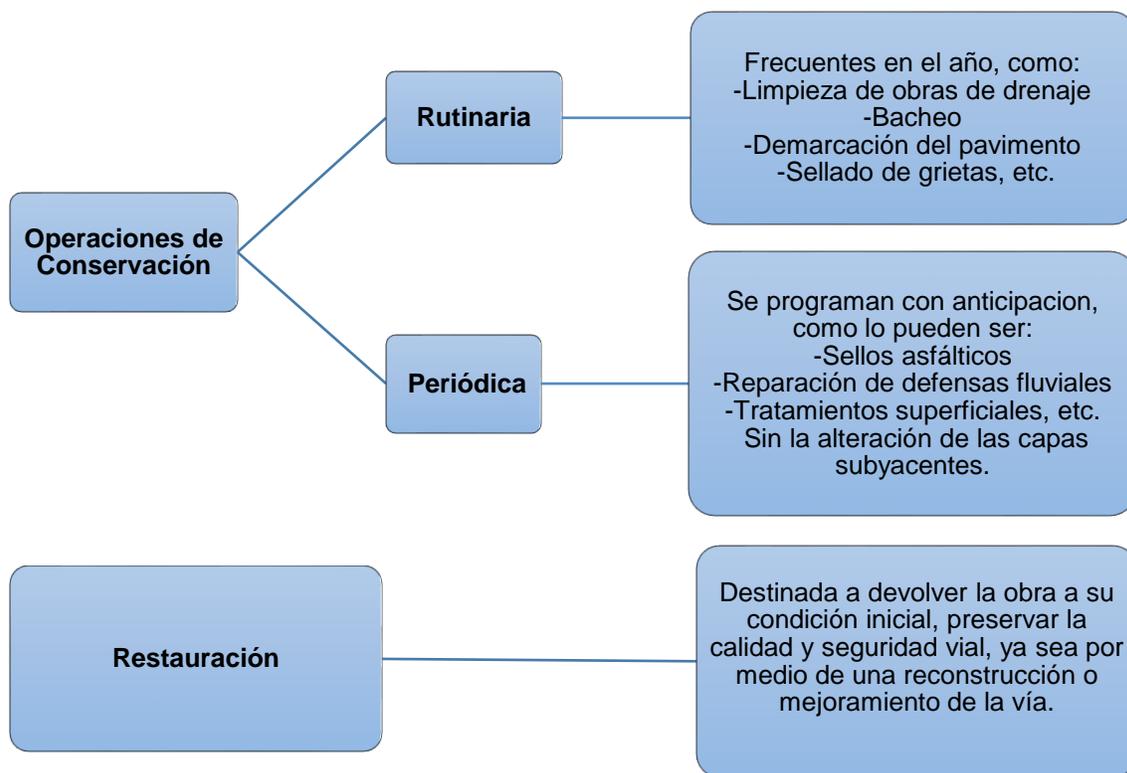


Figura 10. Clasificación de conservación vial (Valenzuela, 2003).

El mantenimiento oportuno de estas vías de comunicación representa entre 3 a 5 veces menos de inversión, que la restauración de dichos caminos (Valenzuela, 2003).

Es importante recalcar que la conservación vial no comprende la construcción de vías nuevas ni parte de ellas.

## 3.2 Métodos de Bacheo.

Las acciones de bacheo son las más comunes en la reparación de fallas localizadas en pavimentos.

Recordando lo que se dijo en el capítulo anterior de éste documento, el bacheo es generalmente entendido como la remoción y reposición de un área localizada severamente dañada, o el relleno de huecos producidos por disgregación. Así mismo, se realiza para corregir fallas estructurales manifestadas por la aparición de grietas del tipo piel de cocodrilo de severidad media y alta, ahuellamiento profundo, grietas de deslizamiento y fallas puntuales como huecos, quiebres, hundimientos, etc.

Podemos clasificar las acciones de bacheo como: **Provisional y Permanente**, entendiéndose por bache provisional aquel que se realiza, generalmente, por emergencia, debido a la aparición súbita de una falla que no pueda ser reparada en forma permanente debido a: condiciones climáticas, falta de materiales y/o equipos, etc. Se acepta que su duración es corta y que en poco tiempo debe ejecutarse una reparación permanente. Este tipo de acciones son generalmente realizadas por el hecho de que no pueden planificarse.

El bacheo permanente se ejecuta como mantenimiento menor preventivo o correctivo, o como una actividad rutinaria, previa a una acción de mantenimiento mayor. El bacheo permanente debe llevar la condición del área tratada a la condición de resistencia original del pavimento.

Una reparación por bacheo tendrá distinta duración dependiendo del tipo de falla, causa y tipo de reparación.

El bacheo provisional puede durar de días a semanas, mientras que el permanente meses a años. En este aspecto debe señalarse que el bacheo debe ejecutarse siguiendo procedimientos que aseguren su calidad y durabilidad. En duración su

costo final es elevado. De acuerdo con esta clasificación, encontramos diferentes técnicas de bacheo como se explica en la Figura 11.

Debe tenerse en cuenta que el costo de los materiales en bacheo es solo una pequeña parte del costo total, generalmente inferior al **30%**. El componente mayor de costo está representado por equipos y transporte de materiales, mano de obra y controles de tráfico. De aquí que la ejecución de un bacheo permanente de calidad es altamente beneficioso debido a la reducción de costos y mayor rendimiento (en tiempo) de las labores, ya que se podrán reparar nuevas áreas en lugar de efectuar una segunda o tercera reparación en fallas defectuosamente corregidas (Jugo B., 2005).

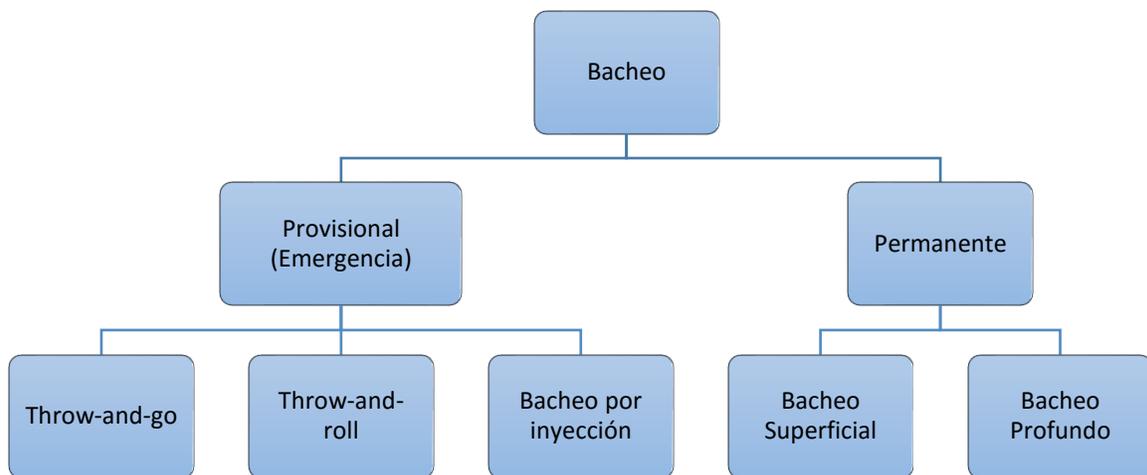


Figura 11. Clasificación y técnicas de bacheo.

### 3.2.1 Bacheo provisional o de emergencia.

Este tipo de bacheo consiste generalmente en el relleno de huecos con mezclas asfálticas en frío o en caliente, materiales granulares, etc. Se ejecutan con poca o ninguna preparación del área afectada, aun cuando el secado y la limpieza, son recomendables. El relleno debe tratar de compactarse en la mejor forma posible, bien empleando equipos de compactación, pisones de mano o los neumáticos de un vehículo cargado, la duración del bache depende en gran parte del nivel de compactación alcanzado.

Esta acción no requiere remoción del pavimento. Consiste en sellar mediante la aplicación de un riego de adherencia y mezcla asfáltica (en frío o en caliente) áreas localizadas que presenten agrietamientos, deformaciones, hundimientos y/o disgregación. El procedimiento consiste en limpiar la superficie, aplicar el riego asfáltico, extender y compactar la mezcla de espesores por lo general entre 2 y 4 cm. En la actualidad existen diversas mezclas con asfaltos modificados las cuales no necesitan un clima demasiado exigente para su colocación en obra. Éstas son mezclas asfálticas en frío, que no requieren de maquinaria pesada y son fáciles de trabajar (Jugo B., 2005).

Existen diferentes técnicas para llevar a cabo el bacheo provisional, de las que podemos distinguir: *Throw and go*, *throw and roll* y el bacheo por inyección, los cuales mencionamos a continuación.

#### 3.2.1.1 *Throw and go (Descargar y marcharse).*

Este consiste en descargar el material, como se muestra en la Figura 12, en la zona de reparación; que además no implica una limpieza de material suelto ni la eliminación de agua; tampoco se realiza la demarcación del área a sustituir y, una vez descargado el material, se procede a la apertura del tramo al tráfico, el cual se encarga de realizar la compactación del área reparada.

Este tipo genera una alta productividad en la reparación de daños, pero sin duda alguna es una solución temporal, ya que el área afectada no es tratada de una forma adecuada que permita una mayor duración de la reparación, además el paso de los

vehículos puede hacer que el material sea desplazado quedando descubierto nuevamente el hueco (Caltrans, 2007).



Figura 12. Técnica de bacheo Throw and go (Caltrans, 2007).

### 3.2.1.2 *Throw and roll (Descargar y compactar).*

Esta forma de bacheo consiste básicamente en la colocación de material en el área dañada como se observa en la Figura 13.1, seguidamente se realiza la compactación, utilizando las llantas de algún vehículo, como las del camión en el que se lleva el material o con pisones manuales (Ver Figura 13.2). De igual manera que la anterior de descargar y marcharse, no es importante la realización de una demarcación del área afectada y tampoco si se encuentra llena de agua o material suelto. Luego de ello, se verifica que la compactación que se hizo esté por encima del nivel de la superficie adyacente, entre 3 y 6 mm, esto con la finalidad de que una vez reabierto el paso vehicular, el tránsito termine de realizar la compactación en los baches. Esta técnica genera un poco más de durabilidad y seguridad en las reparaciones hechas debido a la compactación (Caltrans, 2007).



Figura 13.1. Técnica de bacheo Throw and roll (Caltrans, 2007).



Figura 13.2. Técnica de bacheo Throw and roll (Caltrans, 2007).

### 3.2.1.3 Bacheo por inyección.

El bacheo por inyección es un método rápido y eficaz de parches que requiere equipo especializado, es por eso que éste método no es muy utilizado, se utiliza para caminos de tráfico más bajo y es una alternativa al método de Throw and roll (Descargar y compactar). Estos parches son temporales, pero generalmente tienen una vida más larga que los parches de Throw and roll. A continuación se describen los pasos recomendados para el bacheo por inyección:

- Preparar el sitio para el parche soplando los desechos y el agua del agujero con la boquilla de la aplicación. La Figura 14.1 ilustra la preparación del sitio.

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

- Rociar un riego de adherencia con emulsión asfáltica en los bordes y en la parte inferior del agujero a una velocidad de aproximadamente 1 litro/m<sup>2</sup>. La figura 14.2 ilustra la aplicación de una capa de adherencia.
- Inyectar la mezcla asfáltica en el agujero, llenando el agujero hasta la parte superior. La figura 14.3 ilustra el relleno del bacheo preparado (Caltrans, 2007).



Figura 14.1. Bacheo por inyección (Caltrans, 2007).



Figura 14.2 y 14.3. Bacheo por inyección (Caltrans, 2007).

### 3.2.2 Bacheo permanente.

La alternativa para realizar un bacheo de mayor calidad y durabilidad para las fallas localizadas en pavimentos, y cuando se tiene la oportunidad de planearlo con anticipación, lleva a un proceso denominado bacheo aislado, puede ser necesario un bacheo Superficial o Profundo aislado dependiendo de la profundidad y el alcance de las capas que necesiten ser restauradas para su conservación.

De acuerdo con las normas mexicanas N-CSV-CAR-2-02-003/00 y N-CSV-CAR-2-02-004/03 como parte de la conservación rutinaria en pavimentos asfálticos para trabajos de bacheo superficial y profundo aislado respectivamente.

Se les define como el conjunto de actividades que se realizan para reponer una porción de la carpeta asfáltica que presenta daños como desintegración, en zonas localizadas y relativamente pequeñas, cuando la base del pavimento se encuentra en condiciones estables y sin exceso de agua se opta por el bacheo superficial mientras que el profundo se utiliza cuando estas capas se encuentran en condiciones inestables o con exceso de agua.

Se considera que el bacheo aislado sea utilizado solo cuando las áreas afectadas tengan una extensión menor de cien (100) metros cuadrados, por cada siete mil (7.000) metros cuadrados de pavimento. Si el área dañada continúa creciendo y tiende a ser mayor de los 100 metros cuadrados en la superficie total en un corto período, será necesario aplicar otro tipo de rehabilitación.

Se consideran las ventajas siguientes en la aplicación del bacheo superficial y profundo:

- Permite mejorar la circulación de vehículos en las zonas dañadas
- Detiene el desprendimiento de partículas y la desintegración de la o las capas dañadas en las áreas aledañas a la zona reparada
- Impide la infiltración de agua en las zonas aledañas a la zona reparada para evitar daños mayores
- Mejora el comportamiento mecánico del pavimento, en las zonas reparadas

Sin embargo, esta técnica de bacheo presenta las limitaciones siguientes:

- Es necesario cerrar la zona por reparar al tránsito, durante la realización del bacheo, con su consecuente afectación.
- Se requiere un tiempo considerable para efectuar el bacheo de una sola zona por reparar.
- Cuando el pavimento presenta un porcentaje importante de zonas por reparar, el bacheo aislado no es aplicable.

El procedimiento de ejecución para bacheo superficial es similar al procedimiento de bacheo profundo, establecido en las normas mexicanas N-CSV-CAR-2-02-003/00 y N-CSV-CAR-2-02-004/03 diferenciándose principalmente en que el superficial sólo requiere reponer con nueva mezcla asfáltica la capa asfáltica dañada, mientras que en el profundo, además de reponer la capa asfáltica dañada, es necesario reponer las capas inferiores con nuevo material de base, hasta eliminar las capas que presenten inestabilidad y exceso de agua.

El proceso de bacheo asilado se describe en los siguientes pasos de manera concreta:

1. Se realiza un recorrido de inspección para definir las zonas en donde la capa asfáltica presenta daños y se realizará el bacheo, marcándose con pintura el perímetro que será reparado. Los trabajos de bacheo no se pueden realizar si la temperatura ambiente es inferior a  $15^{\circ}$  C si se va a utilizar mezcla asfáltica en caliente. Si se utiliza mezcla asfáltica en frío, el bacheo no se puede realizar si la temperatura es inferior a  $4^{\circ}$  C. Tampoco se puede efectuar el bacheo si hay amenaza de lluvia o está lloviendo.
2. En la zona por reparar, se procede a cortar sobre las líneas del perímetro previamente marcado con una cortadora de sierra de diamante, hasta una profundidad del espesor de la capa asfáltica por reponer (Figura 15).

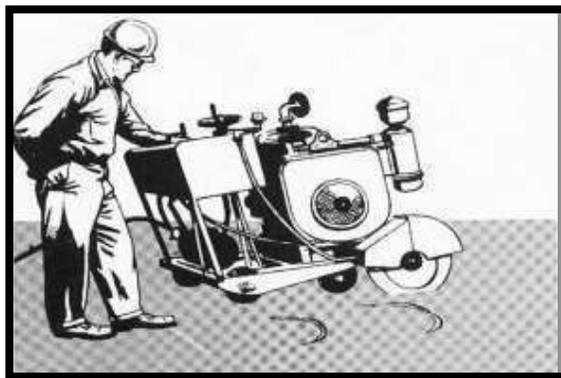


Figura 15. Proceso de cortado de la zona dañada (SCT, 2014).

3. Con escobas se limpia todo el material fino de la caja descubierta y de las zonas de la superficie del pavimento. (Ver Figura 16).



Figura 16. Limpieza de la zona (SCT, 2014).

4. Con un irrigador y con apoyo de la petrolizadora, se efectúa un riego de emulsión asfáltica catiónica (Ver Figura 17).

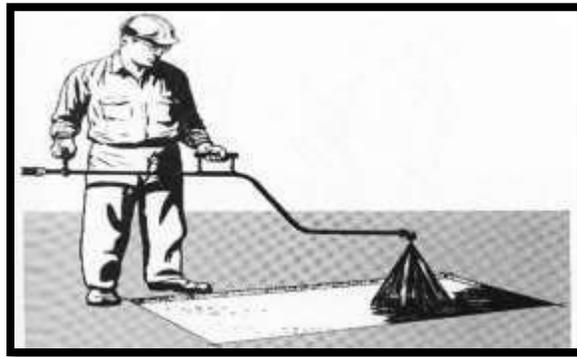


Figura 17. Aplicación de la emulsión (SCT, 2014).

5. A continuación, se coloca y distribuye de manera uniforme un volumen de mezcla asfáltica con nivel superior al nivel superficial del pavimento existente, para que una vez compactada se logre el nivel superficial existente como se ve en la Figura 18.
6. Una vez que la mezcla se encuentra uniformemente distribuida en toda el área de la caja, se procede a compactarla utilizando un compactador de rodillo metálico de tipo manual (Ver Figura 19).



Figura 18. Colocación de la mezcla asfáltica (SCT, 2014).



Figura 19. Compactación de la mezcla (SCT, 2014).

En el caso de bacheo profundo, con apoyo de martillos neumáticos o con picos y palas, se procede a excavar los materiales que conforman las capas inferiores del pavimento, dentro de zona por reparar, revisando las condiciones de saturación en que se encuentran, a medida en que se avanza en la excavación y en el retiro de los materiales inestables, a continuación se procede a colocar por capas, con espesor no mayor de 13 cm en estado suelto, el nuevo material de base hidráulica, el cual debe tener una humedad cercana a la humedad óptima.

Cada capa de material de base se compactará con un compactador manual de tipo neumático (bailarina), hasta que se alcance como mínimo el 100 % de compactación. Finalmente se procede a rellenar el volumen faltante con nueva mezcla asfáltica en caliente o en frío.

### 3.3 Materiales asfálticos para bacheo.

Dentro de los materiales empleados para realizar trabajos de bacheo, se pueden citar las mezclas asfálticas producidas en caliente, mezclas tibias y mezclas en frío.

#### 3.3.1 Mezcla asfáltica en caliente

Es la combinación de cemento asfáltico, agregados minerales y eventualmente relleno mineral o aditivo, íntimamente combinados en las proporciones y temperaturas de diseño. El mezclado debe ser tal que todas las partículas de los agregados queden cubiertas en su totalidad por una película de ligante. Se le llama así puesto que tanto los agregados como el asfalto se llegan a calentar a temperaturas de entre 120 – 165 °C para asfaltos convencionales, en asfaltos modificados se pueden emplear temperaturas de hasta 180-185°C, por lo que es conveniente solicitar al proveedor la carta de viscosidad del material.

#### 3.3.2 Mezcla asfáltica tibia

El concepto de mezcla tibia surge ante la necesidad de usar una mezcla bituminosa que ofrezca economía de energía y que a su vez mantuviese el mismo desempeño de las mezclas producidas en caliente.

Las mezclas asfálticas tibias se describen como aquellas que se producen a temperaturas menores que las mezclas en caliente, es decir entre 60°C y 80°C. Su producción involucra nuevas tecnologías a partir de las cuales es posible producir y colocar los concretos asfálticos a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales.

#### 3.3.3 Mezcla asfáltica en frío

La mezcla asfáltica en frío, es una mezcla de agregado mineral con o sin relleno mineral, con asfalto emulsionado, rebajado o para este caso aditivado, todo el proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente (Fonseca, 2012).

### 3.4 Bacheo en México.

Las vialidades a nivel internacional son víctimas de daños y patologías debido a varias causas, de las cuales se hablaron previamente, México es un país que no se

excluye de sufrir tales desperfectos en sus pavimentos, es por eso que en los últimos años varias ciudades de la república han implementado a través de sus gobiernos programas de solución, específicamente hablando, de los deterioros debidos a la desintegración de sus pavimentos flexibles.

Los baches son un daño muy común que se presenta o pueden presentarse en un futuro, en caminos de cualquier tipo y en cualquier época del año.

En México la inversión que se hace por parte de las autoridades competentes para la rehabilitación de daños inducidos por bacheo es millonaria, es por eso que la aplicación de nuevas tecnologías y nuevas técnicas para resolver este problema, ha ido incrementado hasta hace pocos años.

En esta parte hablaremos solo de algunas ciudades de la república que recientemente han trabajado con programas de bacheo. Como lo es la Ciudad de México, han buscado alternativas desde ya hace varios años para crear programas de bacheo por toda la ciudad, así la Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE), menciona que tan solo entre 2011 y 2015 realizó un total de 85 contratos con un valor de 800 millones de pesos para el bacheo, sin embargo a pesar de esa inversión no se ha podido corregir la situación. La Ciudad de México es una de las ciudades con más desperfectos asfálticos del país pues hasta finales de 2015 se calculaba que existían más de 12 mil 600 baches sin atender.

Ante esa problemática, en los últimos años han aparecido nuevas maneras para reparar las calles, como el llamado bacheo en frío. Este tipo de tecnología asegura la reducción del costo de bacheo, esto se debe a que este nuevo material no causa merma o pérdida. Los municipios y las delegaciones siempre pierden hasta un 20% del material porque este llega a un punto en el que no es trabajable y no se cuenta con la manera de reblandecer la mezcla, mientras que, con el asfalto en frío, esto no se vuelve un problema.

La ciudad de México implementó en agosto de 2016 el programa **Bacheo 24 horas**, que consiste en la conservación y mantenimiento del problema por medio de la técnica de bacheo por inyección y con mezcla en frío. A través de la Dirección

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

General de Servicios Urbanos, la Agencia de Gestión Urbana ha atendido 29 mil 579 desperfectos en la carpeta asfáltica. Otras ciudades son Puebla, Guadalajara, Morelia por solo mencionar algunas.

Puebla destino 14 millones de pesos en la primera etapa de su programa **Bacheton** por medio de su Secretaría de Infraestructura (ver Figura 20) mientras que la ciudad de Morelia en 2016 invirtió la cantidad de tres millones de pesos para obras de bacheo. Guadalajara hizo una inversión de 80 millones de pesos, por parte del gobierno en Julio de 2016, al igual que en la Ciudad de México, la técnica de bacheo utilizada fue por medio de inyección (ver Figura 21).



Figura 20. Obras de bacheo en la ciudad de Puebla, Puebla (Fuente: pueblacapital.gob.mx)



Figura 21. Obras de bacheo en la ciudad de Guadalajara, Jalisco (Fuente: guadalajara.gob.mx).

## **Capítulo 4. Análisis del desempeño de mezclas frías para bacheo con la aplicación de diferentes asfaltos aditivados.**

### **4.1 Generalidades.**

Durante el proceso de investigación en el que se llevó éste proyecto, se colaboró con la empresa SemMaterials México S. de R.L. de C.V. en adelante referida como SMM; con la necesidad de desarrollar un producto asfáltico que cumpla con las características y estándares de calidad de una mezcla en frío para bacheo , haciendo el uso de las nuevas tecnologías en mezclas asfálticas, como lo es el utilizar asfaltos aditivados que le permita a la mezcla mejorar su rendimiento en comparación con la mezcla asfáltica en caliente convencional, y de esta manera satisfacer las necesidades que existen actualmente en el país en el área de la conservación vial de cualquier camino, y que para las instituciones encargadas del mantenimiento rutinario de éstas vías sea una opción de bacheo más sencillo en su forma de aplicación, a un costo menor y con una calidad superior a los productos que existen en la actualidad.

Para fines de esta investigación nos enfocaremos en la caracterización de los agregados pétreos y el comportamiento de la mezcla asfáltica para bacheo; para la parte del ligante asfáltico, únicamente mencionaremos las características principales de éste, sin someterlo a pruebas ni evaluaciones particulares.

En el siguiente capítulo se explicará de manera detallada el diseño de la mezcla de bacheo con asfaltos aditivados, mencionando las características que se debe buscar en una mezcla en frío de éste tipo, y cada una de las pruebas bajo las cuales estuvo sometida la mezcla para determinar la calidad y el desempeño esperado.

En México existe poca investigación en el área de las mezclas en frío de bacheo, por eso el poco uso que tiene en el campo de la conservación vial, a diferencia de países como Estados Unidos, que a través de algunos de sus departamentos de

transportación llevan a cabo investigaciones sobre mezclas patentadas de éste tipo, determinando el comportamiento y requerimientos de calidad de la mezcla.

## 4.2 Características y comportamiento de una mezcla fría para bacheo.

El uso de las mezclas en frío de bacheo aplica principalmente para el bacheo de tipo Throw and roll (Descargar y compactar), debido a la naturaleza de la mezcla que simplifica el procedimiento a solo colocar y compactar, sin la necesidad de aplicar una fuente de calor para mejorar su trabajabilidad, además de poder utilizarla en cualquier clima y sobre casi cualquier superficie sin importar la condición en la que se encuentre, es por eso que el diseño de éste tipo de mezcla lleva a la necesidad de buscar cuenta con propiedades específicas para su uso, como lo es la trabajabilidad de la mezcla, resistencia a la acción del agua, una buena estabilidad, adhesividad, durabilidad, que sea almacenable, entre otras, las cuales se explican a continuación. Las características deseadas en la mezcla de bacheo en frío son:

### 4.2.1 Trabajabilidad.

Se requiere trabajabilidad durante las operaciones de manipulación y durante la colocación. La mezcla de bacheo en frío debe ser lo suficientemente blanda y flexible para facilitar a uso manual, especialmente en climas fríos. La mezcla debe estar libre de grumos que son difíciles de romper. La mezcla con poca trabajabilidad suele producir parches deficientes. La temperatura tiene un efecto pronunciado sobre la trabajabilidad porque controla la dureza del ligante. Durante el tiempo frío, el ligante puede ser relativamente rígido y se pueden hacer mejoras usando ligantes de baja viscosidad.

### 4.2.2 Resistencia a la acción del agua.

El fenómeno que es causa de la separación del ligante asfáltico del agregado, conocido como Stripping, es usual en presencia de agua. Si la mezcla es susceptible de stripping, la mezcla de bacheo en frío puede desprenderse, haciendo que el parche falle. El desprendimiento será más significativo si se utiliza el material de

bacheo de mezcla fría para reparar los baches que se formaron debido al drenaje deficiente del agua. El desprendimiento también puede resultar cuando la mezcla no se compacta adecuadamente. Las mezclas en frío de bacheo también pueden desprenderse debido al mal recubrimiento del agregado durante la mezcla. Este problema es evidente

Debido a esto el asfalto aditivado junto con el agregado deben someterse a pruebas que determinen la ausencia de problemas de stripping.

#### 4.2.3 Propiedades adhesivas.

La adhesión hace que la mezcla se adhiera al pavimento subyacente y a los lados del bache. Tanto el tipo como la cantidad de ligante influyen en la adhesividad de la mezcla de bacheo. Los asfaltos blandos generalmente se adhieren mejor que los asfaltos más duros. La adhesividad adecuada se obtiene normalmente aumentando la cantidad del asfalto en la mezcla. Muy a menudo las cuadrillas de mantenimiento no toman tiempo para limpiar y secar el agujero a fondo para que se pueda aplicar la capa adhesiva adecuada. En tales casos una mezcla pegajosa de bacheo es provechosa.

#### 4.2.4 Estabilidad.

Una mezcla de bacheo debe ser estable después de la colocación y compactación para resistir el desplazamiento vertical y horizontal debido a las cargas de tráfico, especialmente justo después de la compactación cuando el material aún no está curado. La estabilidad también se ve reforzada por la debida atención en la granulometría y a los agregados. La falta de estabilidad provoca el empuje y el desplazamiento de la mezcla.

#### 4.2.5 Resistencia al deslizamiento.

Es deseable una resistencia de deslizamiento adecuada para parches largos y grandes. Puede producirse deslizamiento si la mezcla contiene agregados que son fácilmente pulidos y/o contenido excesivo de asfalto, lo que provoca exudación de la mezcla. La mezcla de bacheo debe estar diseñada para tener una resistencia adecuada al deslizamiento, esto significa que debe usarse un agregado bueno, de

bajo pulimento, grueso y fino, y el contenido de asfalto estrechamente controlado para evitar el exceso de ligante.

#### 4.2.6 Durabilidad.

La durabilidad es la resistencia de la mezcla de parche al deterioro debido al tráfico y a las condiciones atmosféricas. Los problemas de durabilidad suelen aparecer en forma de desprendimiento, que se define como la pérdida progresiva de agregado de la superficie de una reparación.

La durabilidad de las mezclas de bacheo está estrechamente relacionada con la cantidad y el tipo de asfalto. Se consigue una mayor durabilidad con un contenido de asfalto óptimo. La viscosidad del asfalto también puede influir significativamente en la durabilidad. Los asfaltos blandos se consideran a menudo más deseables. La granulometría también influye en la velocidad de endurecimiento.

#### 4.2.7 Curado.

Es importante que la mezcla se cure completamente después de haber sido colocada en el agujero. El parche que no se ha curado completamente será susceptible de empujar y penetrar.

#### 4.2.8 Almacenamiento.

Una mezcla de bacheo en frío debe seguir siendo viable cuando se almacena durante un período de tiempo deseado (6 a 12 meses). Si la mezcla no tiene el tipo adecuado de asfalto aditivado, puede perder volátiles demasiado rápido y se vuelve más difícil de trabajar con el tiempo. Cubriendo la mezcla con lonas o polietileno se extiende el tiempo de almacenamiento.

#### 4.2.9 Resistencia al sangrado de asfalto.

El sangrado está relacionado con el exceso de asfalto en la mezcla de bacheo. La mezcla de bacheo debe tener una cantidad adecuada de ligante asfáltico que el agregado pueda contener sin ningún drenaje medible. Después de la compactación de la mezcla en el agujero, debe haber suficientes huecos dentro del agregado

mineral para mantener esta cantidad de ligante, al menos 5% hasta 8% de vacíos de aire para asegurar la resistencia al sangrado.

#### 4.2.10 Otras consideraciones.

Entre otras consideraciones que deben abordarse en el desarrollo de nuevas mezclas. La seguridad de los trabajadores es de suma importancia. Los materiales ligantes y disolventes no deben crear un riesgo de incendio ni ser tóxicos según lo definido por las agencias de seguridad y medio ambiente. Este requisito excluía el uso de materiales tales como fibras de amianto, azufre y otros aditivos orgánicos. El material de bacheo no debe liberar productos químicos tóxicos al ambiente que puedan causar contaminación en el borde de la carretera u otra degradación ambiental. Satisfacer los requisitos anteriores requiere un equilibrio entre muchos factores diferentes (Munyagi, 2006).

### 4.3 Diseño de la mezcla de bacheo.

En la actualidad no existe un método determinado para llevar a cabo un diseño de una mezcla de bacheo en frío para que sea almacenable y trabajable, por lo que es un reto el diseño de la mezcla, ya que son varios los factores que intervienen en su desempeño ideal, como es el tipo de ligante asfáltico, las propiedades de los agregados pétreos, la gradación de los agregados, el contenido de asfalto, por mencionar solo algunos.

Por ejemplo, la granulometría abierta facilita la trabajabilidad pero también hace que la mezcla sea permeable. Un ligante que mejora la trabajabilidad puede reducir la estabilidad de la mezcla. Es por eso que el diseño de mezclas en frío de bacheo depende de las propiedades de ingeniería deseadas.

Un estudio realizado por Anderson, D. A. para la Administración Federal de Carreteras de Washington DC (1988) en su reporte "Materiales de parcheo para pavimentos asfálticos en clima húmedo" informó los criterios para el diseño de una mezcla fría bacheo almacenadas de la siguiente manera (Munyagi, 2006):

- En primer lugar, establecer el contenido máximo permisible de ligante para que la mezcla no drene excesivamente.

- En segundo lugar, garantizar una trabajabilidad adecuada a baja temperatura por medio de un ensayo de trabajabilidad llevado a cabo a la temperatura de mezcla más baja esperada en el campo.
- En tercer lugar, garantizar la resistencia al agua.

Con base en las necesidades y características deseadas en la mezcla asfáltica, para este estudio se planteó con la empresa SMM, una secuencia de evaluaciones para el diseño en laboratorio de la mezcla de bacheo en frío, con diferentes granulometrías y ligantes, realizando una comparación entre las mezclas para definir la de mejor desempeño.

El análisis de la mezcla de bacheo se hará con dos tipos de asfalto aditivado elaborados por SMM, que por fines de privacidad no se hablarán de las formulaciones ni aditamentos en el asfalto, ya que estos son diseños propios de SMM; en combinación de cuatro granulometrías, con agregado pétreo de un banco para las granulometrías de bacheo y otro para la granulometría densa; en la Tabla 13 se muestran la denominaciones asignadas a los materiales empleados para su identificación a lo largo de la investigación.

Tabla 13. Denominación de los materiales para elaboración de mezclas de bacheo.

ESTUDIO DE MEZCLA DE BACHEO	
MATERIAL	DENOMINACIÓN
AGREGADO PÉTREO (GRANULOMETRÍA)	Fina
	Intermedia
	Gruesa
	Densa
ASFALTO ADITIVADO	Prototipo 1
	Prototipo 2

Consideraciones como para una buena trabajabilidad de la mezcla, se desea una clasificación abierta, mientras que después de que la mezcla se coloca en un bache, se necesita una clasificación más densa para mejorar la durabilidad. Además, para obtener una buena trabajabilidad, deben evitarse agregados de forma angular, sin embargo, una vez que la mezcla está en su lugar, es deseable un alto grado de angularidad para una mejor estabilidad. Se desea una viscosidad de ligante más

baja para la capacidad de almacenamiento y la trabajabilidad, pero después de la colocación se desea una viscosidad más alta tan pronto como sea posible para una mejor cohesión de la mezcla (Munyagi, 2006). Aspectos que fueron tomados en cuenta junto con SMM, para establecer un proceso de investigación y diseño, como se muestra en la siguiente imagen (ver Figura 22), donde se mencionan las etapas del diseño desde la evaluación del agregado hasta el comportamiento de mezcla después de un período de almacenamiento.

Posteriormente, a lo largo de los temas que restan se explicará la importancia y el proceso de las evaluaciones a los materiales para elaborar la mezcla asfáltica de bacheo en frío, así como a los agregados pétreos y las pruebas directamente a la mezcla, para verificar que cumpla con las características necesarias para considerarse apta para utilizar en procesos de rehabilitación de pavimentos, anticipándose a posibles problemas durante su elaboración, almacenamiento y colocación. Los diseños y la evaluación de la mezcla se llevaron a cabo en las instalaciones del centro técnico de SMM en su laboratorio de investigación y control de calidad de mezclas asfálticas, ubicado en San Andrés Cholula, Puebla, México.

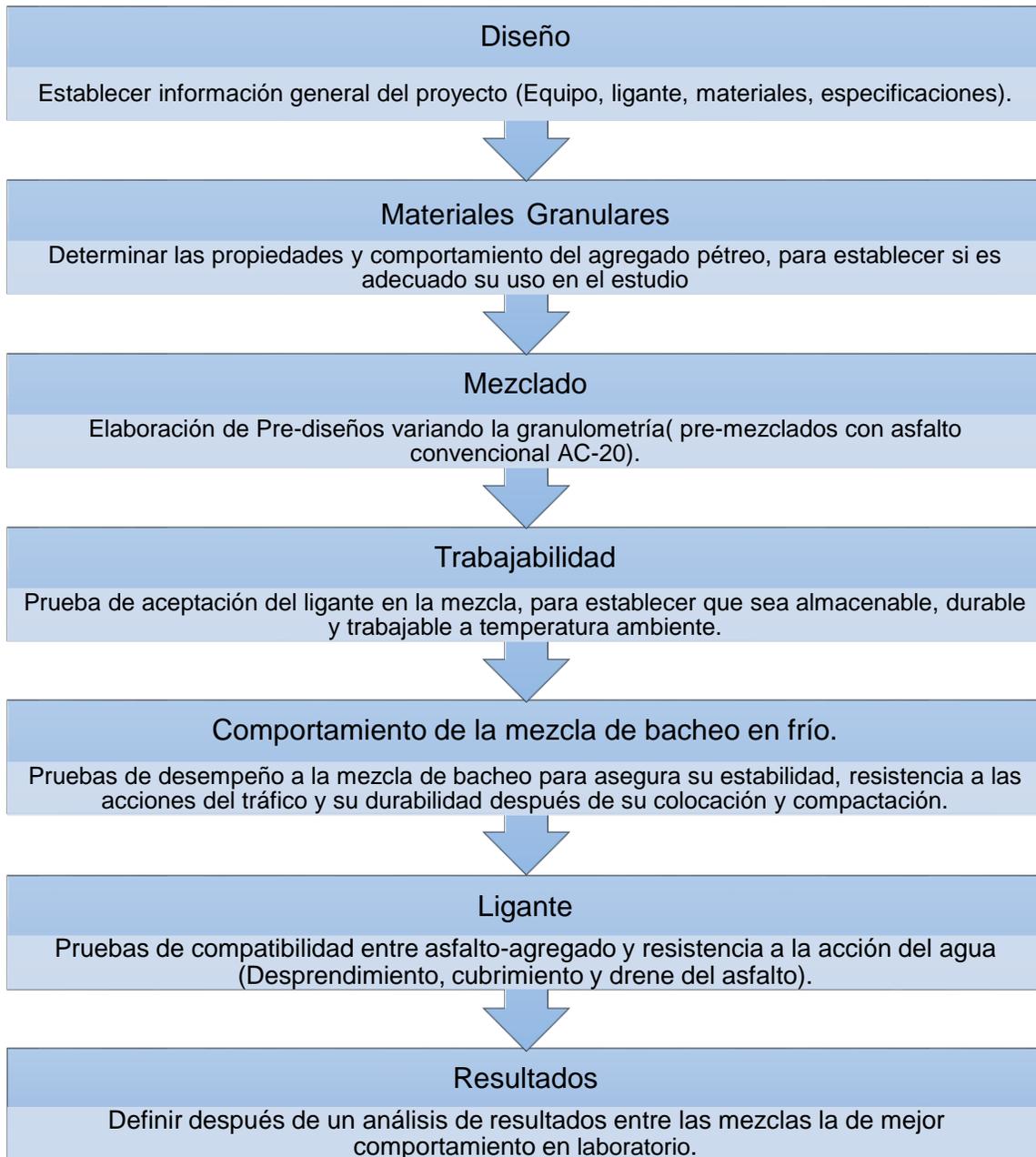


Figura 22. Proceso de estudio de la mezcla de bacheo

## 4.4 Propiedades y caracterización del material pétreo.

### 4.4.1 Generalidades.

Aún con la falta de un diseño para la mezcla de bacheo en frío, no se tiene especificaciones ni evaluaciones establecidas para los agregados pétreos, dado que los materiales de bacheo se someterán de igual manera a las acciones

ambientales y del tráfico como una mezcla en caliente convencional, se acepta el mismo criterio de exigencia para ellos; por lo que el análisis se llevará a cabo en base a las normas vigentes en el país, normativas como las establecida por la SCT, ASTM International (American Society for Testing and Materials) y AASHTO para la calidad y características físicas que deben cumplir las fracciones gruesas y finas del agregado.

Recordando la importancia de las propiedades del agregado para el comportamiento adecuado de la mezcla de bacheo en frío como lo son la clasificación, el tamaño y forma de los agregados, la angularidad, textura, resistencia al desgaste y compatibilidad con el ligante.

Para el estudio se define el uso de una fracción gruesa (Grava) y una fina (Arena), para su uso en las granulometrías de bacheo, materiales procedentes del banco Tonalá, ubicado en la carretera Lagos de Moreno- Guadalajara en el Km 181+400 en el estado de Jalisco, México; materiales de tipo basáltico producto de trituración total y cribado.

#### 4.4.2 Reducción de muestras.

##### 4.4.2.1 Definición y alcance.

De acuerdo con el manual M-MMP-4-04-001 de la SCT, el muestreo consiste en obtener una porción representativa del volumen del material pétreo en estudio. Después de muestrear directamente en los bancos de explotación, almacenes de materiales o durante maniobras de carga y descarga, será necesario reducir las muestras en cantidades representativas nuevamente a fin de verificar que éstos cumplan con los requisitos de calidad descritos en la dicha norma o proyecto.

La cantidad y número de cuarteos depende de los materiales y la prueba, respecto al tamaño nominal del agregado (TN)<sup>1</sup>, para las pruebas realizadas en éste estudio se empleó un cuarteador como el de la Figura 23 para reducir problemas al momento de reducir las muestras y asegurar fiabilidad en los resultados obtenidos.

---

<sup>1</sup> Tamaño Nominal (TN): Es la malla inmediata superior a la primera malla que retiene más del 10% de las partículas del agregado, en una serie estándar de una granulometría.

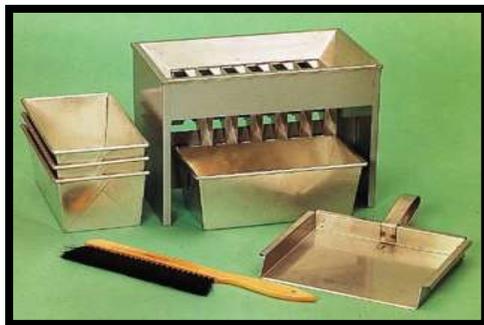


Figura 23. Cuarteador metálico Fuente: Presentación AMAAC, Ensayos y especificaciones (agregados).

#### 4.4.2.2 Método de prueba (Designación: ASTM C702-98)

El proceso se puede llevar de manera manual de la siguiente manera:

Para agregados gruesos:

Se coloca la muestra en una superficie firme, limpia y nivelada, se mezcla 3 veces la muestra y en la última mezcla se forma un cono, se aplanan la superficie cónica hasta uniformizar el espesor y el diámetro para dividir la muestra en cuatro partes iguales. Se procede a tomar dos cuartos opuestos y mezclarlos sucesivamente hasta obtener el tamaño de la muestra deseada.

Para agregados finos:

Se humedecer el material, se colocar muestra en una superficie, firme y nivelada. Mezclar 3 veces la muestra y en la última formar un cono. Tomar mínimo 5 porciones aleatorias del cono para formar la muestra de ensaye.

(Designación: M-MMP-01-03-03)

Para el empleo del cuarteador, éste tiene un número igual de aberturas de los ductos separadores en ambas direcciones de vertido. Estará equipado con una tolva con ancho igual o menor que las aberturas en general, longitud igual a la del cuarteador, así como con 2 charolas laterales para recibir el material.

Si es necesario se divide de manera manual la muestra previamente para no exceder la capacidad del cuarteador. Se vierte la muestra sobre el cuarteador, cuidando pasen cantidades similares por cada uno de los ductos sobre las charolas.

Si la cantidad de material obtenida así es mayor que la requerida, se repite este procedimiento con una de las porciones, tantas veces como sea necesario reducir su tamaño.

#### 4.4.3 Peso Volumétrico.

##### 4.4.3.1 *Definición y alcance.*

En la norma ASTM C 29 se define la densidad total o peso unitario de los agregados como la masa de un volumen unitario de agregado, en la cual el volumen incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de vacíos entre las partículas.

De forma resumida el peso unitario consiste en determinar la densidad total como el resultado de dividir la masa de un agregado en estado seco (en un determinado nivel de consolidación o compactación) y el volumen que éste ocupa incluyendo los vacíos de aire entre partículas y los de absorción y se expresa en  $\text{kg/m}^3$ . Los resultados obtenidos en este ensayo son necesarios para el proporcionamiento de asfalto en mezclas y para conversiones masa/volumen en la aceptación de materiales en la obra.

El término común utilizado con el cual se denomina la densidad total en agregados es la determinación del Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS) y el Peso Volumétrico Seco y Compacto (PVSC).

##### 4.4.3.2 *Método de prueba (Designación ASTM C29).*

Se introduce el agregado en el molde seleccionado en su estado suelto, llenándolo por medio de una cuchara o pala teniendo el cuidado de evitar en la medida de lo posible la segregación, como se observa en la Figura 24.



Figura 24. Equipo para pesos volumétricos.

Para el caso del PVSC, se llena el molde en tres capas a la misma altura de caída, cada capa es compactada por la aplicación de 25 golpes (igualmente espaciados sobre su superficie) con una varilla.

A continuación se nivela la superficie enrasando con una cuerda o regla teniendo el cuidado de no presionar mucho para no compactar ligeramente su estado. A continuación se determinan los pesos del molde con el agregado y del peso del molde solo (con una precisión de al menos 0.1 lb ó 0.05 kg) y se procede a realizar la serie de cálculos (con las unidades consistentes) como se muestra a continuación (Ver ec. 1):

$$PVSS \text{ o } PVSV = \frac{(Gs - T)}{V}$$

ec 1 Cálculo del Peso volumétrico Seco Suelto.

Donde:

PVSS o PVSV = Peso volumétrico seco suelto o varillado en kg/m<sup>3</sup>

Gs = Peso del agregado suelto o varillado, más el recipiente en kg

T= Peso del recipiente en kg

V= Volumen del recipiente en m<sup>3</sup>

#### 4.4.3.3 Resultados de la prueba (Designación ASTM C29).

Tabla 14. Pesos volumétricos del agregado grueso.

Muestra	1	2
Peso recipiente + muestra S y S	6111.4	6033
Peso recipiente + muestra S y V	6506.5	6394.1
Peso del recipiente (gr)	1667	
Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	2860	
PVSS promedio (kg/m <sup>3</sup> )	1540.3	
PVSV promedio (kg/m <sup>3</sup> )	1672.5	

Tabla 15. Pesos volumétricos del agregado fino.

Muestra	1	2
Peso recipiente + muestra S y S	5759.9	5774.5
Peso recipiente + muestra S y V	6582.3	6714.3
Peso del recipiente (gr)	1667	
Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	2860	
PVSS promedio (kg/m <sup>3</sup> )	1433.6	
PVSV promedio (kg/m <sup>3</sup> )	1741.7	

#### 4.4.4 Análisis granulométrico.

##### 4.4.4.1 Definición y alcance.

La SCT en su manual M-MMP-4-04-002 explica que el análisis granulométrico tiene por objeto determinar la distribución de tamaños de las partículas del material pétreo empleado en mezclas asfálticas, mediante su paso por una serie de mallas con una abertura determinada. El paso va de la más grande, hasta llegar a la más cerrada, para así obtener la masa que se retiene en cada malla, después se calcula su porcentaje respecto al total y se define la que pasa.

Generalmente la granulometría se elige de acuerdo a la función requerida para la capa o mezcla asfáltica, para el caso de las mezclas en frío de bacheo se usan granulometrías de diferentes graduaciones dependiendo del comportamiento deseado y necesidades del proyecto.

Debido al desempeño que se puede presentar en la mezcla al usar una granulometría de gradación fina, gruesa o una intermedia, se establece para el estudio de las mezclas de bacheo el evaluar y analizar el comportamiento de las tres alternativas de graduación. Con base a estudios de mezclas en frío de bacheo usualmente utilizadas en otros países, como los realizados por los Departamentos de Transportación de Texas (Project 0-4872) y Oregón (Report. No. OR-RD-01-19), se cuenta con algunas recomendaciones que se utilizaron para definir las granulometrías de bacheo, por mencionar las siguientes:

- Cuando se desea una clasificación abierta, usar como tamaño máximo de agregado de 9.5 mm (3/8"), o no exceder de 13 mm y solo usar un máximo de 2% en finos (Malla N°200).
- Mezclas de un tamaño, son mezclas con agregados gruesos y que contiene muy poco material más fino que el tamiz de 4.75mm, tienen su resistencia principalmente de la trabazón de los agregados, el ligante funciona esencialmente como impermeable, cura bastante rápido después de la compactación por la cantidad de vacíos que permiten escapar más rápido los volátiles y tienen una trabajabilidad razonable.
- Granulometrías con clasificación fina-densa, distribuyen los tamaños de sus partículas entre la parte gruesa y fina, en ocasiones no tienen buena trabajabilidad y la cantidad de finos reducen la adhesividad de la mezcla.
- Mezclas finas que hacen pasar el 100% de materiales por el tamiz de 9.5 mm ó 4.75 mm hacen la mezcla flexible y manejable, con mayor superficie de contacto lo que demanda más asfalto aumentando su durabilidad, permanece flexible por un período prolongado después de su colocación en campo lo que genera que siga adaptándose a la geometría del bache.

En base a estos estudios se establecieron tres tipos de granulometrías en SMM y adicionalmente a las de bacheo en frío se evaluará una granulometría de tipo densa de alto desempeño del Protocolo AMAAC PA - MA 01, utilizada en la elaboración de mezclas en caliente. A continuación se observan las Tablas 16 y 17, con los

límites granulométricos de cada una de ellas y posteriormente las Figuras de la 25 a la 28, correspondientes a las curvas granulométricas.

Los materiales pétreos para la granulometría densa del Protocolo AMAAC, provienen del banco La letra ubicado en la carretera Puebla-Azumiatla Km 011+000, material de tipo roca basáltica y de un proceso de trituración total y cribado; los agregados fueron evaluados previamente por el laboratorio de SMM, por lo que se clasifican como aptos para el uso en el estudio de la mezcla de bacheo y no será necesaria su evaluación. El tamaño nominal de éste agregado es de 19 mm (3/4”), por lo que los requisitos de granulometría densa se observan en la Tabla 17.

Tabla 16. Límites granulométricos para mezclas en frío de bacheo.

Tamaño abertura		Mezcla Gruesa		Mezcla Intermedia		Mezcla Fina	
Plg	mm	% que pasa	Tolerancia	% que pasa	Tolerancia	% que pasa	Tolerancia
1"	25	100	-	-	-	-	-
½	12.5	95-100	-	100	-	100	-
¼	6.25	55-75	±5	90-100	-	90-100	-
No. 8	2.36	15-40	±6	12--40	±6	35-60	±6
No. 60	0.25	0-5	±2	0-5	±2	2—10	±3
No. 200	0.075	-	-	-	-	0-5	±2

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

Tabla 17. Requisitos (puntos de control) para granulometría densa Protocolo AMAAC PA-MA 01.

Tamaño abertura de malla		TN 19 mm (3/4")
plg	Mm	% que pasa
1"	25	100-100
3/4"	19	90-100
1/2"	12.5	-90
3/8"	9.5	-
No. 4	6.3	-
No. 8	2.36	23-49
No. 16	1.18	-
No. 30	0.6	-
No. 50	0.3	-
No. 100	0.15	-
No. 200	0.075	2—8

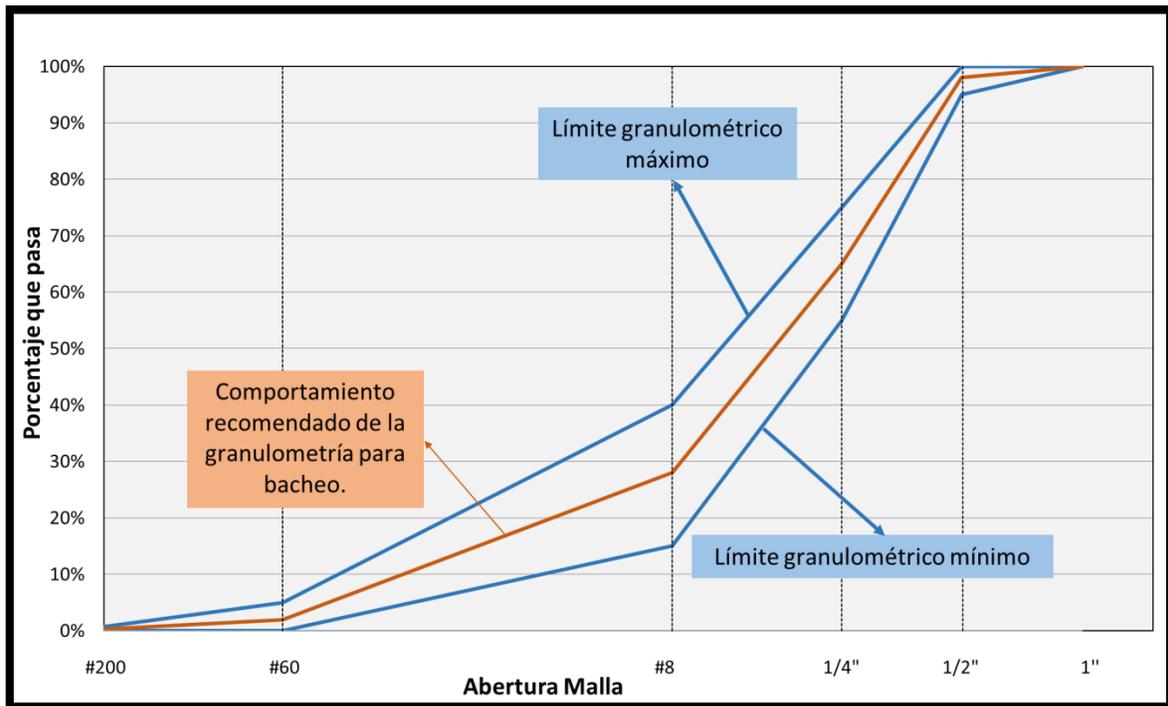


Figura 25. Gráfica de la curva de granulometría gruesa para bacheo en frío.

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

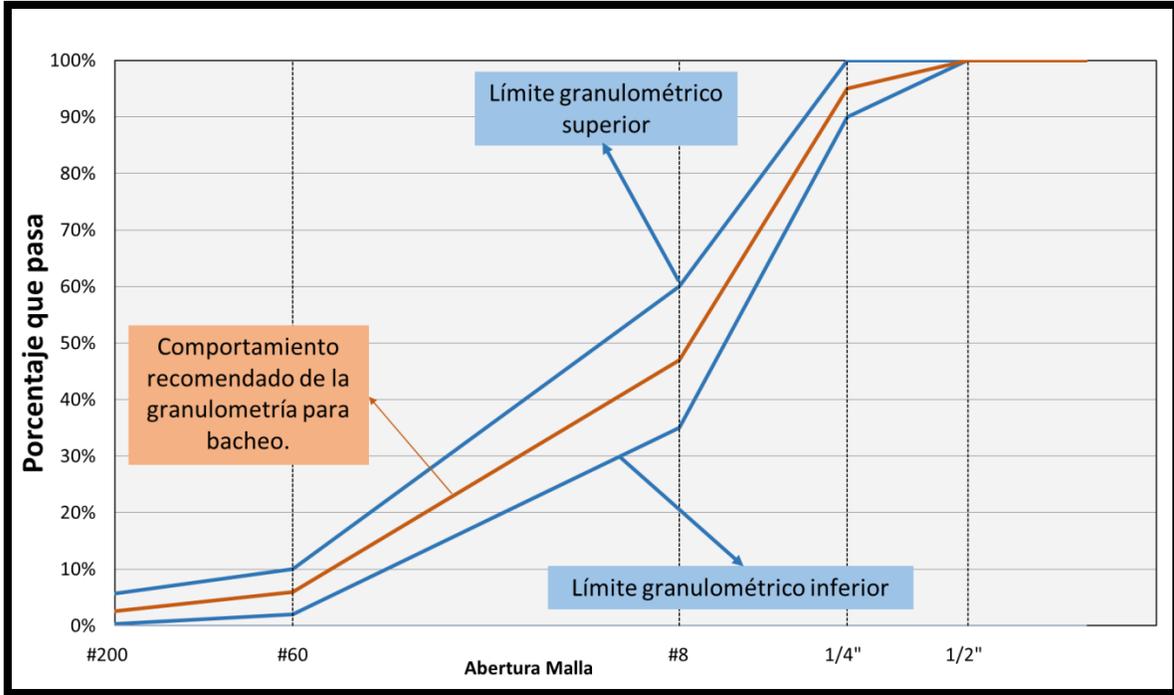


Figura 26. Gráfica de la curva de granulometría fina para bacheo en frío.

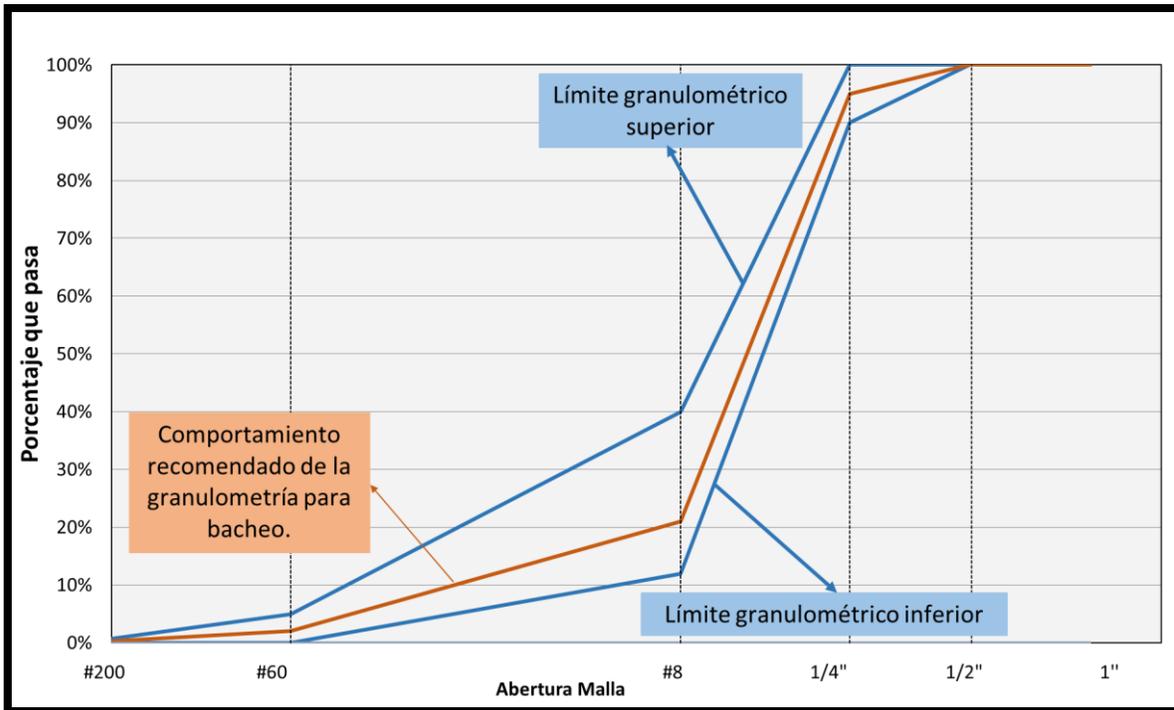


Figura 27. Gráfica de la curva de granulometría intermedia para bacheo en frío.

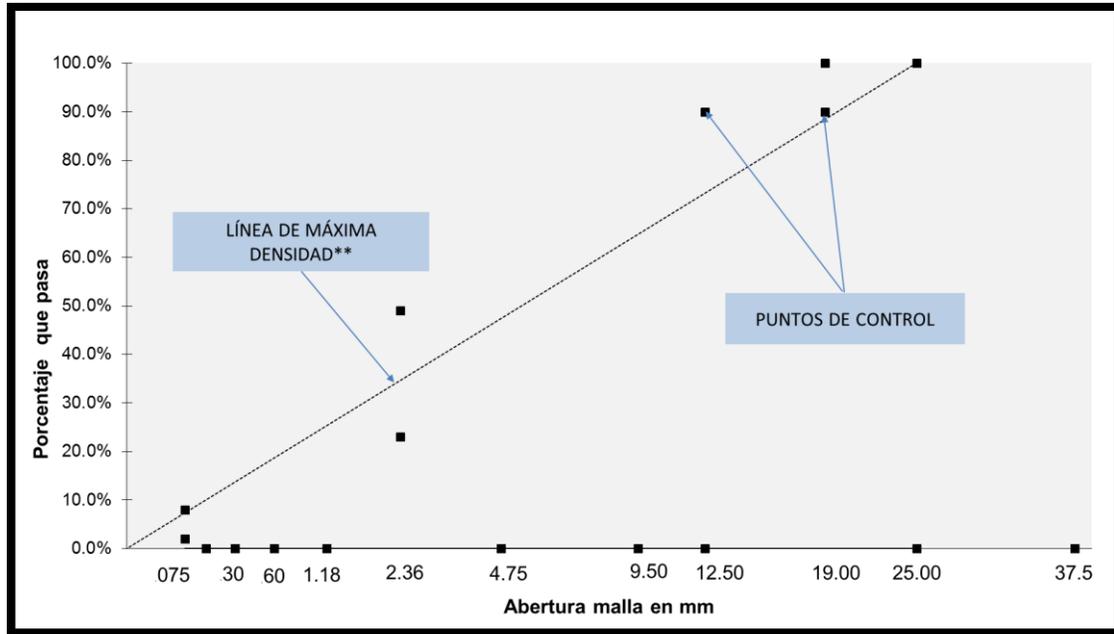


Figura 28. Gráfica de granulometría densa para agregados con TN de 19mm (3/4"). Protocolo AMAAC PA-MA-01.

De acuerdo con la publicación técnica N° 246 del IMT, la granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. Evidentemente, esta granulometría debe evitarse porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de una película de asfalto lo suficientemente gruesa, como para obtener una mezcla durable.

#### 4.4.4.2 Método de prueba (Designación ASTM C136).

Obtener la muestra necesaria de acuerdo a su TN, como se observa en la Tabla 18, lavar el material por la malla N° 200, secar la muestra a masa constante a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y registrar su peso (masa inicial).

Seleccionar las mallas con las aberturas adecuadas para proporcionar la información requerida por las especificaciones de cada granulometría a evaluar. Ordenar las mallas de tamaño decreciente de abertura de arriba hacia abajo y colocar la muestra en la malla superior. Cribar el material por un tiempo suficiente hasta que no pase más del uno por ciento (1%) de material en masa respecto al material retenido sobre la malla durante un (1) minuto continuo manual.

Tabla 18. Cantidad mínima de la muestra para análisis granulométrico.

TN	Tamaño mínimo (kg)
1" (25 mm)	10
3/4" (19 mm)	5
1/2" (12.5 mm)	2
3/8" (9.5 mm)	1
Finos	0.3

Finalmente registrar los pesos retenidos en cada malla y calcular los porcentajes correspondientes (masa final). Si las cantidades de masa inicial y masa final difieren en más del 0,3%, sobre la base de la masa de muestra seca original, los resultados no deben utilizarse para fines de aceptación. Registrar los resultados a un decimal (0.1).

#### 4.4.4.3 Resultados de la prueba (Designación ASTM C136).

Tabla 19. Análisis granulométrico del agregado grueso.

Masa previa al lavado (g)		5003.6
Masa final posterior al lavado (g)		4978.4
Masa de pérdida (g)		25.2
Tamaño abertura de malla		% Que pasa
mm	Plg	
25	1"	100%
12.5	½	69%
6.25	¼	29%
2.36	No. 8	6%
0.25	No. 60	0.14%
0.075	No. 200	0.03%
Pasa No. 200		0%

Tabla 20. Análisis granulométrico del agregado fino.

Masa previa al lavado (g)		1033
Masa final posterior al lavado (g)		911.8
Masa de pérdida (g)		121.2
Tamaño abertura de malla		% Que pasa
mm	plg	
25	1"	100%
12.5	1/2	100%
6.25	1/4	100%
2.36	No. 8	93%
0.25	No. 60	10%
0.075	No. 200	2%
Pasa No. 200		0%



Figura 29. Equipo utilizado para el análisis granulométrico.

Tabla 21. Análisis granulométrico del banco la Letra.

Agregado		Fino	Grueso
Masa previa al lavado (g)		1835.1	1628.1
Masa final posterior al lavado (g)		1827.2	1625.1
Masa de pérdida (g)		7.9	3
Tamaño abertura de malla		% Que pasa	% Que pasa
Mm	plg		
12.5	1/2"	100%	100%
9.5	3/8"	100%	75%
6.3	No. 4	93%	2%
2.36	No. 8	65%	1%
1.18	No. 16	44%	1%
0.6	No. 30	30%	1%
0.3	No. 50	21%	1%
0.15	No. 100	16%	1%
0.075	No. 200	11%	1%
Pasa No. 200		0%	0%

#### 4.4.5 Densidad y Absorción de los materiales pétreos.

##### 4.4.5.1 Definición y alcance.

La SCT en su manual M-MMP-1-05/03 establece que las pruebas determinan las relaciones masa-volumen de los materiales respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción de los materiales y se utiliza para calcular los volúmenes ocupados por el material o mezcla de materiales en sus diferentes condiciones de contenido de agua y el cambio de masa del material debido a la entrada de agua en sus poros, con respecto a su condición en estado seco, las

pruebas se realizan de diferente manera para el material retenido en la malla N° 4 (4.75 mm) y la porción que pasa dicha malla.

De acuerdo con la norma ASTM C127 y C128 esta característica es generalmente utilizada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado pétreo en la mezcla. Para el proceso se utiliza la gravedad específica cuando el agregado está húmedo, es decir, si se ha satisfecho su absorción.

Los valores de absorción se utilizan para calcular el cambio en el peso cuando se considera que el agregado ha estado en contacto con agua lo suficientemente largo como para satisfacer la mayor parte del potencial de absorción. El valor estándar de laboratorio para la absorción es el obtenido después de sumergir el agregado seco durante aproximadamente 24 h en agua. Por el contrario, algunos agregados cuando se usan pueden contener una cantidad de humedad absorbida menor que la condición mojada de 24 h.

Los poros en agregados ligeros pueden o no ser esencialmente saturados de agua después de la inmersión durante 24 h. De hecho, muchos de estos agregados pueden permanecer inmersos en agua durante varios días sin satisfacer la mayor parte del potencial de absorción de los agregados.

#### 4.4.5.2 Método de prueba (Designación ASTM C127).

Este proceso es el utilizado para la parte gruesa que se retiene en la malla N° 4 (4.75mm):

Se seca el material hasta peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ . Posteriormente se reduce a la cantidad de muestra representativa necesaria en base a su TN como dice la Tabla 22.

Tabla 22. Cantidad mínima de la muestra para análisis de la densidad del material grueso.

TN	Tamaño mínimo (kg)
1" (25 mm)	4
3/4" (19 mm)	3
1/2" (12.5 mm)	2
3/8" (9.5 mm)	1.5 - 1.8

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

Después se sumerge el material pétreo en agua para saturarlo durante un período de  $24 \pm 4$  h. Retire la muestra de prueba del agua y colóquela en un paño absorbente grande hasta que se retiren todas las películas de agua visibles.

Pesar la muestra de ensayo en la condición saturada de superficie seca. Registre esto y todos los pesos subsiguientes hasta el 0,5 g más cercano. Después del pesaje, coloque inmediatamente la muestra de ensayo de superficie seca en el recipiente de muestra y determine su peso en agua a  $23 \pm 1.5$  ° C (Figura 30).



Figura 30. Peso sumergido de la muestra.

Secar la muestra de ensayo hasta peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C, enfriar en aire a temperatura ambiente de 1 a 3 h, o hasta que el agregado se haya enfriado a una temperatura que sea cómoda de manejar y registrar su peso seco.

### Cálculos.

$$Gsb = \frac{P_{seco}}{P_{sss} - P_{sum}}$$

ec 2. Densidad relativa del grueso

$$Gsa = \frac{P_{seco}}{P_{seco} - P_{sum}}$$

ec 3. Densidad relativa aparente del grueso.

$$\% Abs = \left( \frac{P_{sss} - P_{seco}}{P_{seco}} \right) \times 100$$

ec 4. Porcentaje de absorción del grueso.

Dónde:

Gsb= Densidad relativa secado al horno, aproximación a 2 decimales.

Gsa= Densidad relativa aparente, aproximación a 2 decimales.

%Abs= Porcentaje de absorción, aproximación al 0.1%.

Pseco= Peso seco de la muestra después del horno.

Psss= Peso saturado de superficie seca.

Psum= Peso sumergido en agua de la muestra.

#### 4.4.5.3 Resultados de la prueba (Designación ASTM C127).

Tabla 23. Densidad y absorción del agregado grueso.

Muestra	1	2
Peso seco de la muestra (g)	3213.4	3043.8
Peso SSS de la muestra (g)	3248.1	3077.4
Peso Sumergido de la muestra (g)	2074.9	1964.3
Densidad relativa (Gsb)	2.739	2.735
Densidad Aparente (Gsa)	2.822	2.820
Absorción	1.1%	1.1%
Gsb promedio	2.737	
Gsa promedio	2.821	
Absorción promedio	1.1%	

#### 4.4.5.4 Método de prueba (Designación ASTM C128).

Este proceso es el utilizado para la fracción fina que pasa por la malla N° 4 (4.75mm):

Secar el material hasta peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  y reducir la muestra aproximadamente a un (1) kilogramo, en seguida poner el material en un proceso de saturación del 6% de humedad durante un período de  $24 \pm 4$  h. Retirar el material del proceso de saturación y colocar sobre una superficie no absorbente. Utilizar el equipo del cono y pisón para determinar la condición de satura de superficie.

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

Llenar parcialmente el picnómetro con agua a temperatura de  $23 \pm 2$  °C, para posteriormente introducir  $500 \pm 10$  gr de material en la condición saturado de superficie seca, registrar el peso exacto del material colocado en el picnómetro. Llenar con agua el picnómetro hasta un 90% de su capacidad, tapar, invertir y agitar hasta eliminar las burbujas de aire durante un período de 15 a 20 minutos, al finalizar llenar el picnómetro hasta la marca de calibración y registrar el peso del picnómetro con agua y el material. (Figura 31).

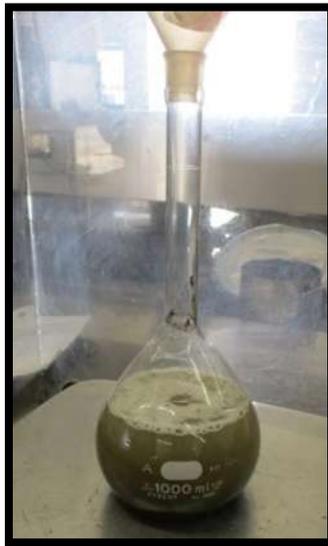


Figura 31. Picnómetro más muestra más agua, prueba de densidad del fino.

Colocarlo en el horno hasta un peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5$ °C, para posteriormente registrar el peso seco del material. Para calibrar el picnómetro, llenar hasta la marca de calibración con agua a temperatura de  $23 \pm 2$ °C para registrar la masa del picnómetro con agua.

### Cálculos.

$$G_{sb} = \frac{P_{sec}}{P_{cal} + P_{sss} - P_{pam}}$$

ec 5. Densidad relativa del fino.

$$G_{sa} = \frac{P_{sec}}{P_{cal} + P_{sec} - P_{pam}}$$

ec 6. Densidad relativa aparente del fino.

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

$$\%Abs = \left( \frac{P_{SSS} - P_{sec}}{P_{sec}} \right) \times 100$$

ec 7. Porcentaje de absorción del fino.

Dónde:

Gsb= Densidad relativa secado al horno, con aproximación a dos decimales.

Gsa= Densidad relativa aparente, con aproximación a dos decimales.

%Abs= Porcentaje de absorción, con aproximación a 1 decimal.

Psec= Peso seco del material

Psss= Peso saturado de superficie seca

Pcal= Peso de calibración del picnómetro con agua.

Ppam= Peso del picnómetro con agua y material.

#### 4.4.5.5 Resultados de la prueba (Designación ASTM C128).

Tabla 24. Densidad absorción del agregado fino.

Muestra	1	2
Peso SSS de la muestra (g)	500	500.5
Peso Picnómetro + agua	1244.1	1244.2
Peso Picnómetro + agua + muestra	1561.7	1562.1
Peso seco de la muestra (g)	492.1	492.7
Densidad relativa(Gsb)	2.698	2.698
Densidad Aparente (Gsa)	2.820	2.819
Absorción	1.6%	1.6%
Gsb promedio	2.698	
Gsa promedio	2.819	
Absorción promedio	1.6%	

#### 4.4.6 Partículas planas y alargadas.

##### 4.4.6.1 Definición y alcance.

En la construcción de carpetas asfálticas, se ha relacionado la presencia de altos porcentajes de partículas alargadas y/o lajeadas en un material pétreo, algunos establecen que debido a la presencia de estas partículas el desempeño del pavimento se ve afectado, pero sin poder relacionarlo directamente.

De acuerdo con la norma ASTM D4791 este método de ensayo proporciona un medio para verificar el cumplimiento de las especificaciones que limitan dichas partículas o determinar las características de forma relativas de los agregados gruesos.

Algunos estudios han determinado que la cantidad de partículas planas y alargadas afectan situaciones como:

El porcentaje de estas partículas cambia como resultado del manejo, almacenamiento y mezclado. A mayor cantidad de estas partículas se incrementa el riesgo de ruptura durante el proceso de compactación. A mayor cantidad, los vacíos en el agregado mineral se incrementan

En una relación de dimensiones 1:3, en un rango de 10 – 40% de partículas alargadas y lajeadas, no hay diferencias significativas en el comportamiento de la mezcla.

Las partículas planas o alargadas de agregados, para algunos usos de construcción, pueden interferir con la consolidación y resultar en materiales duros, difíciles de colocar.

El aparato utilizado deberá ser un equipo adecuado para ensayar partículas agregadas para cumplir con las definiciones de 3.1, con las relaciones dimensionales deseadas.

El dispositivo de la pinza proporcional ilustrado en la Figura 32, es ejemplo de dispositivos adecuados para este método de ensayo. El dispositivo ilustrado en la Figura 32 consiste en una placa base con dos postes fijos y un brazo basculante

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

montado entre ellos de manera que las aberturas entre los brazos y los postes mantienen una proporción constante. La posición del eje se puede ajustar para proporcionar la proporción deseada de dimensiones de apertura, pueden establecerse relaciones de 1: 2, 1: 3, 1, 4 y 1: 5.

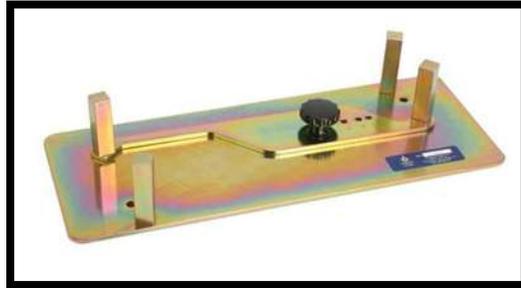


Figura 32. Dispositivo de pinza proporcional para evaluación ASTM D4791.

Referencia: Presentación AMAAC Ensayos y especificaciones (agregados).

#### 4.4.6.2 Método de prueba (Designación ASTM D4791)

Preparar la muestra de ensayo de acuerdo al TN como dice la Tabla 25.

Tabla 25. Muestra mínima para partículas planas y alargadas.

TN	Tamaño mínimo (kg)
1" (25 mm)	10
3/4" (19 mm)	5
1/2" (12.5 mm)	2
3/8" (9.5 mm)	1

Cribar la muestra que se va a ensayar. Utilizando el material retenido en los 9,5 mm (3/8") o por la de 4,75 mm (N ° 4) obtener cada fracción de tamaño requerida de las que muestra la Tabla 26.

Tabla 26. Fracciones a evaluar para partículas planas y alargadas.

Tamaño Partícula
3/4"
1/2"
3/8"

Pruebe cada una de las partículas en cada fracción de tamaño y colóquelas en uno de tres grupos: plano, alargado y ni plano ni alargado. Después de haber clasificado las partículas en el grupo determine la proporción de la muestra en cada grupo por recuento o por masa, según se requiera.

#### 4.4.6.3 Resultados de la prueba (Designación ASTM D4791).

Tabla 27. Partículas planas y alargadas, banco Tonalá.

Tamaño Partícula	Masa de la muestra (g)	Planas (g)	Alargadas (g)	Planas y Alargadas (g)
3/4"	0	0	0	0
1/2"	777.3	48.4	39	5.7
3/8"	688.7	33.1	17.8	1.5
SUMA	1466	81.5	56.8	7.2
Promedio %	Partículas Planas	Partículas Alargadas	Planas y Alargadas	
	5.6	3.9	0.5	
% partículas Planas + Alargadas	9.4			
% partículas planas y Alargadas	0.5			

#### 4.4.7 Caras fracturadas

##### 4.4.7.1 Definición y alcance.

De acuerdo con la norma ASTM D5821 una cara fracturada se define como causada por medios mecánicos o por naturaleza y debe tener bordes afilados o ligeramente embotados. Las fracturas naturales, para ser aceptadas, deben ser similares a las fracturas producidas por una trituradora. Una superficie rota que constituye un área igual al menos al 25% de la superficie proyectada de la partícula, vista perpendicularmente a (mirando directamente) la cara fracturada, se considera una cara fracturada aceptable.

Partícula de roca que tiene al menos una o dos caras fracturadas, como se requiere para esa clase de agregado en las especificaciones.

Este procedimiento de prueba determina la cantidad (porcentaje) de partículas de roca fracturadas, mediante inspección visual que cumple con requisitos específicos. La cara fracturada de cada partícula de roca debe reunir un área de sección

transversal mínima. Las especificaciones contienen requisitos para el porcentaje de partículas agregadas trituradas, con el propósito de maximizar la resistencia al corte en mezclas de agregados unidos o no unidos. Este método puede usarse para determinar la aceptabilidad de agregados gruesos.

#### 4.4.7.2 Método de prueba (Designación ASTM D 5821).

La prueba se lleva a cabo para el material retenido en la malla N° 4 (4.75mm) y se prepara la muestra de material como indica la Tabla 28.

Tabla 28. Muestra mínima para caras fracturadas.

TN	Tamaño mínimo (kg)
1" (25 mm)	3
3/4" (19 mm)	1.5
1/2" (12.5 mm)	0.5
3/8" (9.5 mm)	0.2

Separar las partículas en dos grupos: Partículas que Si cumplen con el criterio de caras fracturadas en la evaluación, antes mencionado y partículas que No cumplen. Determinar la masa o el número de partículas de cada grupo y reportar en porcentaje respecto a la masa inicial con aproximación al entero próximo.

#### 4.4.7.3 Resultados de la prueba (Designación ASTM D 5821).

Tabla 29. Caras fracturadas, banco Tonalá.

Tamaño Partícula	Masa de la muestra (g)	0 Caras Fracturadas	1 Cara Fracturada	2 ó + Caras Fracturadas
3/4"	0	0	0	0
1/2"	777.3	8.5	90.2	678.6
3/8"	688.7	6.4	60.7	621.6
SUMA	1466	14.9	150.9	1300.2
Caras Fracturadas %	0 Caras Fracturadas	1 Cara Fracturada	2 ó + Caras Fracturadas	
	1.0	10.3	88.7	

#### 4.4.8 Resistencia mecánica al desgaste de los Ángeles.

##### 4.4.8.1 Definición y alcance.

Un aspecto fundamental a la hora de evaluar la validez de un agregado pétreo para su empleo en pavimentos o mezclas es determinar su comportamiento mecánico en las condiciones reales de funcionamiento de la vía. Para evaluar dicho comportamiento, así como la degradación de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo, existen una serie de ensayos que, si bien logran determinar las propiedades mecánicas de dicho árido de forma aislada, no consiguen caracterizar el estado tensional del árido en el conjunto del firme como lo es la prueba de Desgaste de los Ángeles (ASTM C131) (Bañon, et. al., 2000).

De acuerdo con el manual M-MMP-4-04-006 la prueba tiene como objetivo determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en colocar una muestra de material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio (Ver Figura 33), en donde es sometida al impacto de esferas metálicas (ver Figura 34) durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia de masas al inicio y después de realizada la prueba.



Figura 33. Máquina de desgaste de los Ángeles.

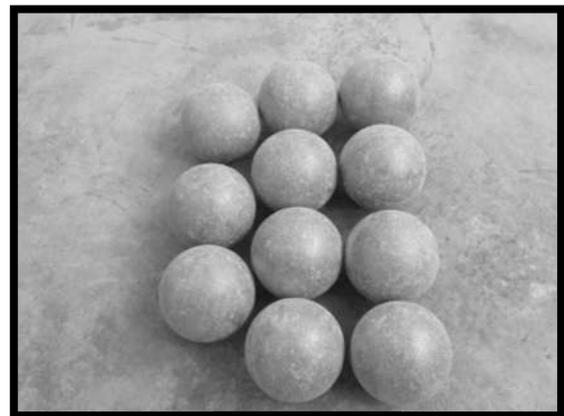


Figura 34. Carga abrasiva para prueba de desgaste de los Ángeles.

#### 4.4.8.2 Método de prueba (Designación ASTM C131).

Se lavará y se secará hasta peso constante el material a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , se utilizará la muestra que mejor asemeje a las características granulométricas del material con las que indica la Tabla 30, y se integrará la muestra con las fracciones requeridas para cada composición. De acuerdo con lo indicado en la Tabla 30, se define la cantidad de esferas requeridas.

Hecho lo anterior se coloca la muestra junto con la carga abrasiva en la máquina de los Ángeles. Al finalizar la prueba se retira el material, se lava y seca hasta peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , para después cribarlo por la malla N° 12 y se determina el peso retenido como la masa final.

Tabla 30. Integración de la muestra para la prueba Desgaste de los Ángeles.

Granulometría	Tamaño de Mallas		Masa de la fracción (g)	Número de esferas	Masa de la carga abrasiva (g)
	Pasa	Retiene			
A	1 1/2"	1"	1250 ± 25	12	5000 ± 25
	1"	3/4"	1250 ± 25		
	3/4"	1/2"	1250 ± 25		
	1/2"	3/8"	1250 ± 25		
B	3/4"	1/2"	2500 ± 10	11	4584 ± 25
	1/2"	3/8"	2500 ± 10		
C	3/8"	1/4"	2500 ± 10	8	3330 ± 20
	1/4"	#4	2500 ± 10		
D	#4	#8	5000 ± 10	6	2500 ± 15

#### Cálculos

$$\%Dsg.LA = \left( \frac{M_i - M_f}{M_i} \right) \times 100$$

ec 8. Desgaste de los Ángeles.

Dónde: %Dsg.LA= Porcentaje de desgaste de los Ángeles, aproximación al entero próximo

Mi= Masa inicial de la muestra antes de iniciar la abrasión.

Mf= Masa final después del cribado por la malla N° 12.

#### 4.4.8.3 Resultados de la prueba (Designación ASTM C131).

Tabla 31. Desgaste de los Ángeles, banco Tonalá.

Tipo Granulometría	B
Masa inicial (g)	4995
Masa final (g)	4371.4
Desgaste L.A.	12%

#### 4.4.9 Microdeval.

##### 4.4.9.1 Definición y alcance.

Es una prueba similar a la del desgaste de los Ángeles, relacionada con la abrasión de los materiales pétreos, la diferencia es que para esta prueba los agregados se encuentran saturados en agua, para evaluar su comportamiento, así como la degradación de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo.

##### 4.4.9.2 Método de prueba (Designación AASHTO T 327).

Lavar y secar el material hasta peso constante a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , para después prepara la masa inicial como lo indica la Tabla 32 y determinar la masa inicial.

Tabla 32. Muestra para microdeval de TN de 3/4".

Tamaño de Mallas		Masa (g)
Pasa	Retiene	
3/4"	5/8"	375
5/8"	1/2"	375
1/2"	3/8"	750

Antes de evaluar el material, se sumerge la muestra en  $2.0 \pm 0.05$  litros de agua de agua a  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  por 1 h mínimo. Después de saturar el material el material se añade 5000 gramos de balines de acero en el contenedor, junto con el agua.

Para ensayar la muestra, se coloca en la máquina como se observa en la Figura 35 y para el caso del tamaño nominal correspondiente se deja el tiempo determinado de abrasión que muestra la Tabla 33.

Tabla 33. Tiempo de abrasión de Microdeval.

TN	Duración, rpm
3/4" (19 mm)	12000 ± 100
1/2" (12.5 mm)	10500 ± 100
3/8" (9.5 mm)	9000 ± 100



Figura 35. Prueba de Microdeval.

Al finalizar la prueba se retira del contenedor lavando el material por las mallas N° 4 y la N° 16, desechando el material más fino que la malla N° 16, retirando los balines, para secar únicamente la muestra hasta peso constante, después del secado se registra la masa final del material con aproximación a 1 gramo.

*Cálculo.*

$$\%Dsg. Microdeval = \left( \frac{M_i - M_f}{M_i} \right) \times 100$$

ec 9. Desgaste Microdeval.

Dónde:

%Dsg Microdeval= Porcentaje de desgaste de microdeval con aproximación a 1 decimal.

Mi= Masa inicial de la muestra antes de iniciar la abrasión.

Mf= Masa final después del cribado por la malla N° 12.

#### 4.4.9.3 Resultados de la prueba (Designación AASHTO T 327).

Tabla 34. Microdeval, banco Tonalá.

TN	3/4"
Masa inicial, g	1500.5
Masa final, g	1372.5
Microdeval	9%

#### 4.4.10 Equivalente de arena.

##### 4.4.10.1 Definición y alcance.

La norma ASTM D2419 define que este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y carácter del material de tipo arcilla presente en la muestra de ensayo. Este método de ensayo proporciona un método de campo rápido para determinar cambios en la calidad de los agregados durante la producción o la colocación.

El objetivo de la prueba es determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos utilizados en mezclas asfálticas mencionado en el manual de la SCT M-MMP-04-04-004.

##### 4.4.10.2 Método de prueba (designación ASTM D2419).

Dividir o separar de 1000 a 1500 g del material que pasa por la malla N° 4.

Se humedece el material para evitar la pérdida de finos. Tomar la medida de lata metálica en una mano y empujarla directamente a través de la base de la pila mientras mantiene la mano libre firmemente contra la pila opuesta a la medida. El

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

exceso de material debe ser eliminado de nivel con la parte superior de la lata, moviendo el borde de la llana en un movimiento de enrasado a través del borde.

Vaciar 4" de solución de trabajo en la probeta y vaciar el espécimen de prueba en la probeta con ayuda de un embudo. Después se golpea enérgicamente la base de la probeta para eliminar las burbujas y humedecer el material. Dejar reposar por  $10 \pm 1$  min. Después de los 10 min tapar la probeta y agitar para despegar el material. Se coloca la probeta en el agitador mecánico. Después de agitar quitar el tapón e irrigar la probeta (firme y vertical) de manera descendente, aplicando suaves punzadas y girando el irrigador mientras fluye la solución de trabajo. Retirar el irrigador y ajustar la solución de trabajo a 15", dejar reposar durante 20 min.

Finalmente se toma la lectura de arcilla directamente de la probeta (nivel superior). Para tomar la lectura de arena se utiliza el pisón el cual debe entrar lento y sin golpear. Ver Figura 36.

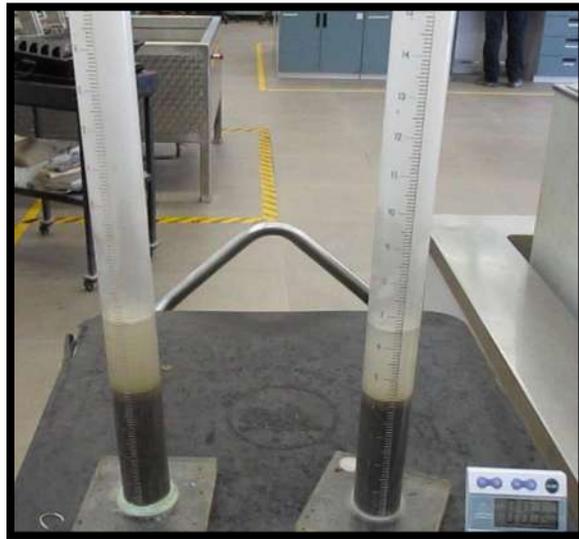


Figura 36. Prueba de Equivalente de arena.

**Cálculo.**

$$\% EA = \left( \frac{L \text{ arena}}{L \text{ arcilla}} \right) \times 100$$

ec 10. Equivalente de arena.

Dónde:

%EA= Porcentaje de equivalente de arena con aproximación al entero superior.

L arena= Lectura de arena tomada con el pisón de la probeta.

L arcilla= Lectura de arcilla tomada de la parte superior de la probeta.

#### 4.4.10.3 Resultados de la prueba (designación ASTM D2419).

Tabla 35. Equivalente de Arena, banco Tonalá.

Muestra	1	2
Lectura de Arcilla, plg.	5.2	5.1
Lectura de Arena, plg.	3.3	3.3
Equivalente Arena	63%	65%
Promedio	64%	

#### 4.4.11 Azul de metileno.

##### 4.4.11.1 Definición y alcance.

El ingeniero Álvaro Muñoz et al. En su estudio “Determinación del valor de sorción de azul de metileno para fillers” explica que la prueba de azul de metileno (AM) es utilizada en la industria del asfalto para estimar el grado de reactividad, en presencia de agua, de fillers (malla N° 200), contenidos en los materiales pétreos para mezclas asfálticas. Esta prueba se basa en cuantificar la capacidad de sorción (fase adsorbida) del filler midiendo la cantidad de AM necesario para cubrir su superficie total (interna y externa).

La capacidad de sorción de cada filler depende de su naturaleza, aunque dicha capacidad aumenta en función de la superficie específica y la carga de éstos. Esta prueba se relaciona con la capacidad del filler de sorber agua y aumentar su volumen. Basados en este principio se han desarrollado distintas técnicas de prueba usando AM, siendo la más utilizada, por su simplicidad y efectividad, la prueba con papel filtro. En México, esta técnica está establecida por la Recomendación AMAAC 05/2008, basada en la manualM-MMP-4-04-014/09 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

#### 4.4.11.2 Método de prueba (Designación AMAAC RA 05/2008).

El material se seca previamente hasta temperatura constante y se criba por la malla N° 200 hasta obtener un mínimo de cinco (5) gramos de filler. Verter en el vaso precipitado un (1) gramo de filler y 30 ml de agua destilada. Agitar vigorosamente la muestra con el agitador magnético y la barra agitadora.

Colocar la solución de azul de metileno 1/1000 en la bureta graduada de 50 ml. Agregar 1 ml de solución a la vez y agitar la suspensión por un minuto y tomar una gota de la suspensión con la punta de la barra de vidrio y colocarla en el papel filtro. Ver Figura 37.

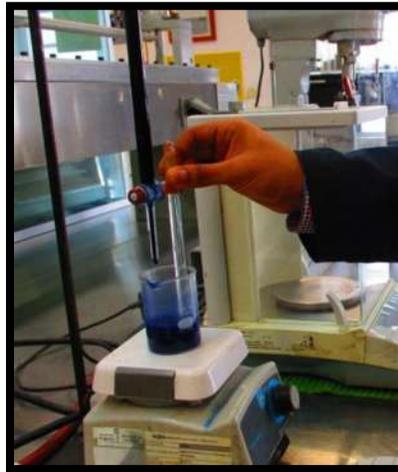


Figura 37. Prueba de azul de metileno.

Observar la gota para identificar la aparición del halo azul, repetir la adición de un mililitro de AM hasta la aparición del halo. Una vez aparecido dejar agitar por cuatro minutos más y tomar nuevamente una gota y con ello confirmar el valor de azul de metileno. Reportar el número de mililitros de solución utilizados hasta la aparición del halo antes de la confirmación a los 4 minutos extras.

#### 4.4.11.3 Resultado de la prueba (Designación AMAAC RA 05/2008).

Tabla 36. Azul de metileno, filler banco Tonalá.

mg/g	14
------	----

#### 4.4.12 Angularidad del agregado fino.

##### 4.4.12.1 Definición y alcance

De acuerdo con la norma AASHTO T 304 el método determina el contenido de vacíos no compacto de una muestra del agregado fino, menor a 2.36 mm (N° 8) y a medida que este porcentaje de vacíos es mayor, mayor es la cantidad de caras fracturadas en el material fino. Al tener el agregado fino mayor angularidad la fricción interna del material se ve también incrementada.

##### 4.4.12.2 Método de prueba (Designación AASHTO T 304).

Prepara la muestra de acuerdo a lo que indica la Tabla 37.

Tabla 37. Muestra para prueba de angularidad.

Mallas Pasa-Retiene	Peso (g)
#8 - #16	44 ± 0.2
#16 - #30	57 ± 0.2
#30 - #50	72 ± 0.2
#50 - #100	17 ± 0.2
Total	190

Homogenizar la muestra de 190 g y verterla en el embudo (Figura 38), para producir la caída libre del material.



Figura 38. Embudo para prueba de angularidad del fino.

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

Registrar el contenido de agregado fino en el cilindro con aproximación a 0.1 g. recombinar el material del cilindro y repetir el procedimiento hasta encontrar un contenido constante. Determinar la densidad específica del agregado fino y realizar los cálculos de la siguiente ecuación (ec. 11) para encontrar la angularidad del agregado fino.

$$\%Angularidad = 100 \left( \frac{V - \frac{F}{G}}{V} \right)$$

ec 11. Angularidad del agregado fino, banco Tonalá.

Dónde:

%Angularidad= Porcentaje de angularidad del fino con aproximación a 1 decimal.

V= Volumen del cilindro.

F= Contenido del agregado fino en el cilindro con aproximación a 0.1g

G= Densidad específica seca del agregado fino.

#### 4.4.12.3 Resultado de la prueba (Designación AASHTO T 304).

Tabla 38. Angularidad del agregado fino, banco Tonalá.

Volumen del cilindro ml	100
Peso cilindro + muestra, g	389.3
Peso de la muestra, g	137.1
Gsb	2.698
Angularidad del agregado fino, %	49%

## 4.5 Evaluación de la mezcla de bacheo en laboratorio.

### 4.5.1 Generalidades.

Para la evaluación de la mezcla de bacheo se tienen que tomar en cuenta los objetivos de este estudio y las características deseadas de las mezclas en frío de bacheo, se mencionó anteriormente no existe un diseño formal para este tipo de mezclas, es por eso que el proceso de investigación que se llevará a cabo a continuación tiene el fin de establecer una mezcla con el desempeño satisfactorio en laboratorio.

Para el diseño de la mezcla de bacheo en frío se establece una serie de pasos y evaluaciones para las diferentes calidades de mezclas, por las variantes como el uso de dos tipos de asfalto aditivado, diferentes contenidos de asfalto y diferentes graduaciones de materiales pétreos, con la necesidad de crear una mezcla que sea trabajable, resistente y durable.

A continuación se presenta un esquema del proceso de evaluación para las distintas mezclas para el proceso de elaboración de prediseños y los ensayos a los que estarán sometidos, creando un ciclo de prueba y error para encontrar una mezcla con la combinación ideal de asfalto-gradación de materiales (Ver Figura 39). Mientras que en la Tabla 39 se señalan las pruebas establecidas para cada etapa del estudio, posteriormente se explicará el alcance y procedimiento aplicado en laboratorio, en las instalaciones de SMM.

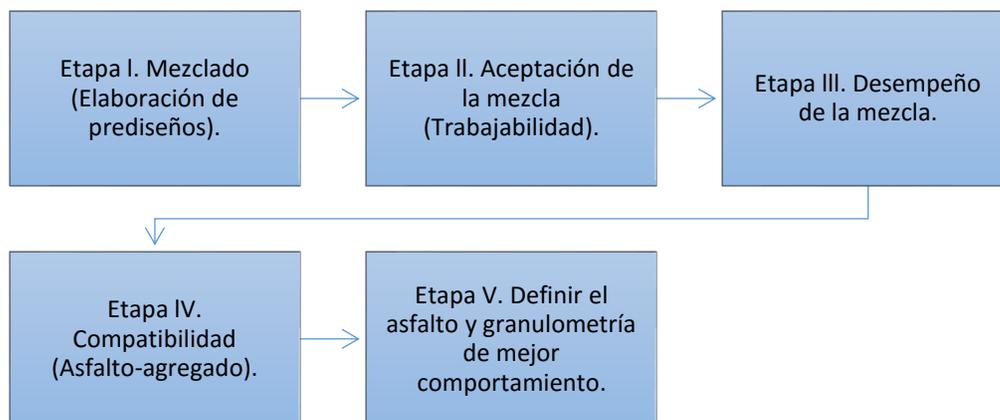


Figura 39. Esquema del proceso de evaluación de mezclas en laboratorio.

Tabla 39. Etapas del estudio de la mezcla de bacheo en frío.

<b>Fase I: Mezclado</b>	
Premezclado con Asfalto AC-20 y mezclado con ligante Prototipo 1	
Premezclado con Asfalto AC-20 y mezclado con ligante Prototipo 2	
<b>Fase II: Aceptación de la mezcla</b>	
Evaluación	Designación
Trabajabilidad	AASHTO TP43-94
<b>Fase III: Desempeño de la mezcla</b>	
Evaluación	Designación
Raveling	ASTM D7196
Estabilidad Marshall inicial y saturada	ASTM 6927
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua	M-MMP-4-05-042
<b>Fase IV: Compatibilidad (Asfalto-agregado)</b>	
Evaluación	Designación
Desprendimiento por ebullición	ASTM D3625
Drene	ASTM D6390
<b>Fase V: Selección de la Mezcla</b>	
Definición de la mezcla apta para bacheo en frío	

Cada proceso de las diferentes etapas fue elaborado de manera controlada garantizando la calidad de la mezcla en estudio, la primer etapa implica el proceso de elaboración de las mezclas, muestras y especímenes necesarios para las evaluaciones posteriores por medio de prediseños para encontrar el contenido óptimo de asfalto, mientras que para la segunda y tercera etapa se enfocan directamente en el comportamiento de la mezcla para su uso en campo, con pruebas de estabilidad y desempeño, manteniendo la trabajabilidad y durabilidad para después de la fabricación y para la cuarta etapa se eligieron pruebas que aseguren que ligante en contacto con los agregados pétreos utilizados no presenten problemas de comportamiento entre uno y el otro, generando deficiencias en el desempeño de nuestra mezcla utilizando el prototipo de asfalto de mejor desempeño en etapas previas.

#### 4.5.2 Elaboración de prediseños (mezclado).

Una vez hecha la caracterización de los materiales pétreos continúa el proceso para el diseño de la mezcla de bacheo, que consiste en la elaboración de prediseños para posteriormente evaluar las características de trabajabilidad y desempeño de las diferentes mezclas, para finalmente hecho el análisis comparativo de los resultados se puede establecer el contenido óptimo de asfalto del diseño, de ésta manera se establece un método de ensaye y error hasta encontrar el diseño adecuado de una mezcla de bacheo en frío.

De acuerdo con el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2011 para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño, el contenido de asfalto es la concentración de masa de cemento asfáltico. Se expresa como un porcentaje de la masa total de la mezcla o como porcentaje de la masa total del agregado. Que depende en gran medida de las características del agregado, la granulometría y de la absorción de los materiales. Para éste proyecto se empleara el porcentaje respecto a la masa total de la mezcla.

Durante el proceso de la elaboración de la mezcla, se establecieron los proporcionamientos de asfalto AC-20 y de los Prototipos de asfaltos aditivado 1 y 2 de la Tabla 40 y la 41, gracias a las recomendaciones como las del estudio de Munyagi (2006), que establecen que el contenido óptimo de asfalto dependerá de las características y comportamiento que se esperan en la mezcla, un contenido alto de asfalto ayudará con la manejabilidad de la mezcla para su uso manual en campo facilitando las labores de aplicación o prolongando el almacenamiento de la mezcla después de su fabricación, pero esto puede crear una mezcla inestable y con posibles problemas de drenaje durante el almacenamiento; en cambio un contenido bajo del asfalto aditivado produce una mayor resistencia en la mezcla pero reduce considerablemente la trabajabilidad, una mezcla estable y con un bajo contenido de asfalto tendrá un curado un poco más rápido por la baja cantidad del ligante utilizado, mismo que proporciona las características de manejabilidad y de almacenamiento, mejorando su comportamiento en campo después de su aplicación.

El objetivo de pre mezclar el agregado con asfalto AC-20, es el reducir la exigencia de asfalto aditivado y de esta manera mejorar la estabilidad de la mezcla en cierto grado. Otro punto de disminuir el consumo de asfalto aditivado es economizar el coste de la mezcla, entendiendo que un asfalto mejorado tiene un costo mayor a un convencional, por lo que una mezcla con un contenido de asfalto únicamente de asfalto aditivado aumenta considerablemente en precio de producción.

Para el estudio es necesario realizar prediseños con contenidos de asfalto entre cinco (5) y seis (6) porciento de la masa total de la mezcla, con variaciones granulométricas y del premezclado de los agregados pétreos con AC – 20 y mezclado con los prototipos de asfalto aditivado. Recapitulando que para la investigación se usaran dos tipos de asfalto aditivado y tres granulometrías diferentes de bacheo, posteriormente de evaluar los dos prototipos de asfalto se seleccionará el de mejor desempeño en las pruebas para emplearlo con las granulometría de una mezcla densa, la Tabla 40 y la 41 indica los distintos contenidos de asfalto a utilizar y las combinaciones de los prediseños para el prototipo de asfalto aditivado 1 y 2 respectivamente, que se realizarán para elaborar las pruebas.

Tabla 40. Prediseños para el Prototipo 1 de asfalto aditivado.

Tipo de granulometría	Pre diseño	Premezclado	Mezclado	Contenido total de asfalto para pre diseño (%)
		Contenido de Asfalto AC - 20 (%)	Contenido de Asfalto Prototipo 1 (%)	
Gruesa	1	1.5	3.5	5
	2	2	3	5
	3	2.5	2.5	5
Intermedia	4	1.5	3.5	5
	5	2	3	5
	6	2	4	6
Fina	7	1.5	3.5	5
	8	2	3	5
	9	2	4	6

Tabla 41. Prediseños para el Prototipo 2 de asfalto aditivado.

Tipo de granulometría	Pre diseño	Premezclado	Mezclado	Contenido total de asfalto para pre diseño (%)
		Contenido de Asfalto AC - 20 (%)	Contenido de Asfalto Prototipo 2 (%)	
Gruesa	10	1.5	3.5	5
	11	2	3	5
	12	2.5	2.5	5
Intermedia	13	1.5	3.5	5
	14	2	3	5
	15	2	4	6
Fina	16	1.5	3.5	5
	17	2	3	5
	18	2	4	6

La Figura 40 explica el criterio de selección de los prediseños con mejor comportamiento para continuar con las etapas de evaluación y descartar las mezclas con el desempeño no deseado o más deficiente, será el mismo criterio usado para los diferentes asfaltos y granulometrías.

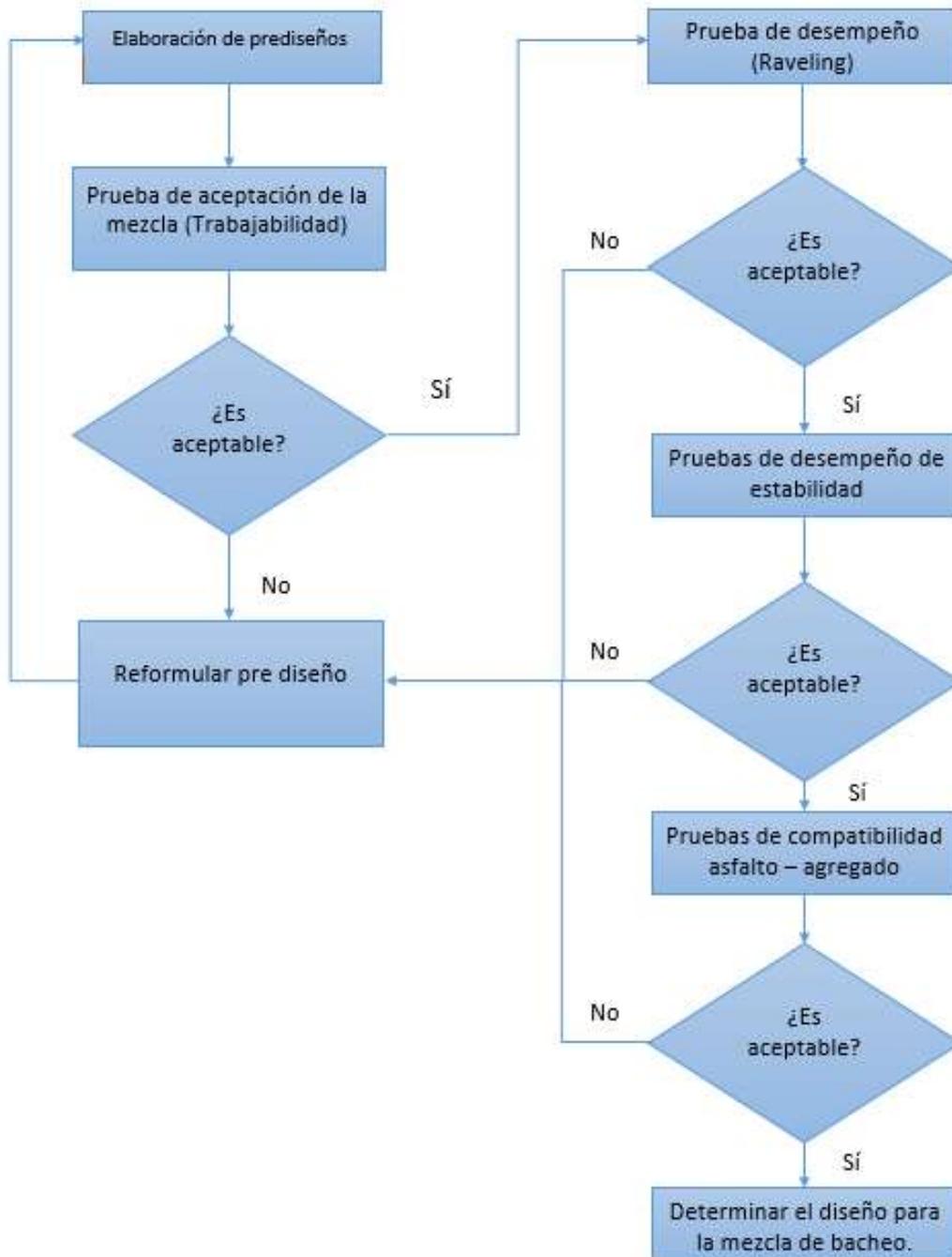


Figura 40. Esquema del criterio de selección de los prediseños.

#### 4.5.2.1 Proceso de mezclado.

El contenido óptimo de asfalto se tomará como la cantidad de asfalto que resulte con una buena calidad de cubrimiento en el agregado, color adecuado en la mezcla, con una buena manejabilidad y desempeño de estabilidad y resistencia de la mezcla compactada. La Figura 41 resume el proceso del mezclado del asfalto con los agregados.

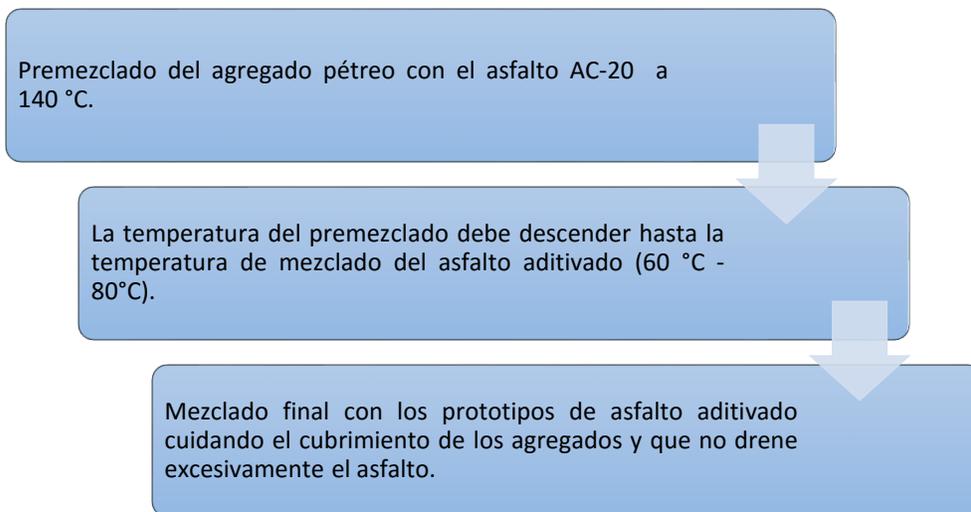


Figura 41. Proceso de mezclado de los prediseños.

Para llevar a cabo el mezclado, el asfalto y los agregados pétreos se introducen en un horno (Figura 42) para alcanzar la temperatura del premezclado de  $140 \pm 5$  °C con asfalto AC-20, por un lapso de dos horas, posterior al premezclado se deja la mezcla fuera del horno hasta alcanzar la temperatura de mezclado para los prototipos de asfaltos aditivados de  $60 \pm 5$  °C (Ver Figura 43 y 43.b), previamente calentados por dos horas en un horno diferente, es importante mantener solo el tiempo necesario los asfaltos en el horno y no exceder las dos horas de calentamiento, esto para evitar entrar en un proceso de envejecimiento del asfalto y que los aditivos utilizados en los prototipos se vean alterados o se pierdan debido a las altas temperaturas.

Una vez listo los asfaltos y los agregados, se hace uso de un molde y una paleta que deben ser de igual manera calentados a temperaturas iguales a las del mezclado, en este caso, se hizo uso de un mezclador mecánico (ver Figura 44); ya

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

preparado el equipo y los materiales, se agrega el asfalto en peso respecto a la masa total de la mezcla, de acuerdo a los contenidos de asfalto de los prediseños antes señalados.



Figura 42. Horno para alcanzar temperaturas de mezclado.



Figura 44. Mezclador mecánico.

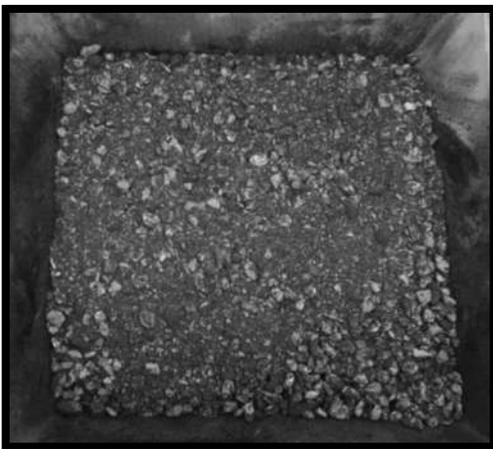


Figura 43 . Premezclado del agregado.



Figura 43.b. Mezclado de AC-20 y Prototipo2.

Cuando se alcanza el cubrimiento de la mayoría de las partículas del agregado pétreo, se vacía la mezcla del molde en un recipiente en el cual se dejará el pre diseño hasta alcanzar la temperatura ambiente, después de eso se podrá hacer uso para las pruebas, respetando las cantidades de material y temperaturas señaladas

para su compactación de ser necesaria y evaluación, acorde a los procedimientos establecidos en las normas señaladas en las Tablas 40 y 41.

### 4.5.3 Trabajabilidad.

#### 4.5.3.1 Definición y alcance.

Chatterjee, Samrat *et al.* (2005) en su estudio “Development of a slump-based workability test for bituminous maintenance mixture” en Washington, D.C., definen la trabajabilidad como la capacidad de una mezcla para ser manejada y la facilidad con la que se puede colocar en el campo. Es una propiedad esencial relacionada con el rendimiento, especialmente para mezclas de bacheo que serán almacenadas. Normalmente se espera que duren hasta seis meses dependiendo de la disponibilidad de materiales.

Este período de tiempo de hasta seis meses varía también de acuerdo con la necesidad de la mezcla.

De acuerdo con la norma AASHTO TP43-94 la prueba de trabajabilidad determina si un producto de mezcla en frío cumple con los requisitos de especificación. La prueba también puede utilizarse para generar información relativa a la viabilidad potencial de un diseño de mezcla en frío programado para la producción.

La prueba de trabajabilidad es un factor para determinar la idoneidad de la mezcla fría para su uso como material de bacheo de pavimentos.

Para la prueba es necesario contar con un penetrómetro de bolsillo con un diámetro igual a 6,5 mm y un rango de escala de 0-430 kPa (4.4 km/cm<sup>2</sup>) o superior. El adaptador del penetrómetro aumentará el diámetro final del penetrómetro a 9,5 mm y una caja de prueba de trabajabilidad construida como un cubo de 102 mm con orificios de 10 mm de diámetro en el centro de 2 lados opuestos. (Ver Figura 45)

Para la muestra de la mezcla usar la graduación de la mezcla de producción en evaluación. Las muestras de laboratorio, serán un mínimo de 3 cada una de 2500 ± 100 g. Revuelva las muestras ocasionalmente o evite la formación de grumos.



Figura 45. Cajas y penetrómetro para la prueba de trabajabilidad.

#### 4.5.3.2 Método de prueba (Designación AASHTO TP43 – 94).

Se coloca en un recipiente cada una de las muestras de 2500 g. para después poner las muestras en el refrigerador y dejar que la mezcla de muestras se estabilice a una temperatura de  $4 \pm 1$  °C como se observa en la Figura 46. Se retira la mezcla enfriada del refrigerador y colóquela en la caja de la prueba de trabajabilidad. No haga ningún esfuerzo para compactar la mezcla de muestras en la caja. Utilizando una velocidad de penetración de  $12 \pm 5$  mm/s empuje el penetrómetro con el adaptador instalado a través del agujero en un lado de la caja en la mezcla de muestra. Registre la resistencia máxima del penetrómetro (Ver Figura 47).

Repetir en el lado opuesto de la caja en la mezcla de muestra el procedimiento y determinar la resistencia a la penetración, una vez tomadas las dos lecturas realizar un promedio para registrar la trabajabilidad de la muestra como la resistencia a la penetración de la mezcla a  $4 \pm 1$  °C en  $\text{km/cm}^2$ .



Figura 46. Prueba a  $4 \pm 1^\circ\text{C}$



Figura 47. Prueba de trabajabilidad

#### 4.5.3.3 Resultados de las pruebas (Designación AASHTO TP43 – 94).

Tabla 42. Resultados de trabajabilidad de prediseños mezclados el asfalto aditivado Prototipo 1.

Pre diseño	Días de almacenamiento	Trabajabilidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Días de almacenamiento	Trabajabilidad (kg/cm <sup>2</sup> )
1	15	0.31	23	0.38
2	15	0.63	23	1.00
3	15	0.50	23	0.79
4	14	0.46	21	0.44
5	14	0.31	21	0.75
6	14	0.38	21	0.79
7	12	0.13	Descartado	
8	12	0.19	Descartado	
9	12	0.19	Descartado	

Tabla 43. Resultados de trabajabilidad de prediseños mezclados el asfalto aditivado Prototipo 1.

Pre diseño	Días de almacenamiento	Trabajabilidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Días de almacenamiento	Trabajabilidad (kg/cm <sup>2</sup> )
10	15	0.10	22	0.06
11	15	0.10	22	0.06
12	15	0.19	22	0.21
13	4	0.21	10	0.20
14	4	0.00	10	0.00
15	4	0.25	10	0.20
16	12	0.00	18	0.00
17	12	0.00	18	0.00
18	12	0.00	18	0.00

#### 4.5.4 Raveling.

##### 4.5.4.1 Definición y alcance.

En base a la norma ASTM D 7196 este ensayo resulta útil para clasificar el curado y la formulación de mezclas en frío a través de ensayos rápidos de especímenes compactados. Esta prueba de rendimiento debe utilizarse para clasificar las condiciones de la mezcla para el tiempo de curado aproximado para el retorno al tráfico y la resistencia a los daños causados por el clima.

Para elaborar los especímenes es necesario separar dos muestras de agregado de la gradación de diseño necesaria a una cantidad de 2700 g de masa. Es una masa aproximada para producir un cilindro de  $70 \pm 5$  mm de alto después de la compactación. Puede ser necesaria una mezcla de prueba para compactar y obtener la masa apropiada de muestra. Utilizando el compactador giratorio.

Colocar la muestra cuando se tenga a una temperatura ambiente en un molde de 150 mm y compactar durante 20 giros en un. Si la altura de la muestra no es de  $70 \pm 5$  mm, debe ajustarse la masa de la muestra.

Quitar las muestras inmediatamente de los moldes de compactación y dejar curar en el tiempo, temperatura y humedad apropiados prescritos por las especificaciones. El tiempo de curado para alcanzar la temperatura ambiente, aplica

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

solo para muestras que es necesario perder humedad o temperatura de compactación.

Pesar los especímenes después del curado, justo antes de la prueba. Esta masa se registrará como masa de muestra (antes de la prueba).

#### 4.5.4.2 Método de prueba (Designación ASTM D 7196).

Coloque el espécimen en la base del adaptador de prueba del equipo de raveling (Figura 48 y 48.b). Se debe tener cuidado de que el espécimen esté centrado y bien soportado. Debe haber un mínimo de 10 mm de la muestra por encima de la base del adaptador de la prueba de raveling.



Figura 48. Equipo de Raveling.



Figura 48.b. Equipo de Raveling.

Después de completar el tiempo de abrasión (15 minutos), retire la muestra cuidadosamente de la base y cepille con la brocha de cerdas finas para quitar cualquier material suelto e inmediatamente pese la muestra. Realizar la prueba por duplicado y obtener un promedio del resultado.

#### Cálculo

$$\%Raveling = \left( \frac{A - B}{A} \right) \times 100$$

ec 12. Raveling

Dónde:

%Raveling= porcentaje de mezcla perdida por la abrasión, reportada al 0,1% más cercano.

A = peso del espécimen antes de la prueba.

B = peso del espécimen después de la prueba.

#### 4.5.4.3 Resultados de la prueba (Designación ASTM D 7196).

Después de seleccionar solo los prediseños de mejor desempeño de trabajabilidad en la mezcla de bacheo, los resultados de éstos en raveling los mostrados en la Tabla 44. Los prediseños tipo “b”, son producto de un nuevo mezclado, conservando la formulación de los prediseños “a” para reafirmar los resultados.

Tabla 44. Raveling de los prediseños aprobados con buena trabajabilidad.

Pre diseño	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Raveling %
1 a	2548.9	2115.4	17.0
11 a	2499	2042.4	18.3
14 a	2500.1	2199	12.0
17 a	2402.3	1923.3	19.9
1 b	2350	2201.6	6.3
11 b	2399	2089.3	12.9
14 b	2299	1997.9	13.1
17 b	2349.9	2107.4	10.3
2 a	2250	2214.7	1.6
2 b	2300	2249.5	2.2



Figura 49. Pre diseño 2 antes de la prueba de Raveling.



Figura 50. Pre diseño 2 después de la prueba de Raveling.

#### 4.5.5 Estabilidad Marshall inicial y saturada.

##### 4.5.5.1 Definición y alcance.

La salida que se informa de esta prueba es la carga máxima que el material puede soportar antes del fallo y la deformación a esa carga. El primer parámetro se conoce como la Estabilidad Marshall y el segundo es considerado como el índice de flujo. La estabilidad es un indicador de la cohesión del material y el índice de flujo está relacionado con la fricción interna. Un mayor valor de estabilidad puede ser sinónimo de una mejor cohesión y una mezcla que se mantenga a cargas más pesadas en el campo. Un índice de flujo más alto indica que el material tendrá menos fricción interna y, por lo tanto, una mayor tasa de deformación permanente en un pavimento.

La estabilidad es generalmente una función de las propiedades del ligante en una mezcla asfáltica y este valor puede aumentarse con un ligante más rígido. El índice de flujo está directamente relacionado con la composición granulométrica de la mezcla. El valor de flujo puede ser alterado cambiando la gradación de agregados pétreos de una mezcla. Algunos investigadores teorizan que un valor de flujo más bajo indica que el contenido de vacíos es demasiado alto (o el contenido de asfalto es bajo) y, por lo tanto, la mezcla es menos durable.

De acuerdo con la norma ASTM D6927 la estabilidad y el flujo Marshall son características de la mezcla de asfalto determinadas a partir de ensayos de especímenes compactados de una geometría especificada. Típicamente, la estabilidad Marshall es la carga de resistencia máxima obtenida durante una secuencia de carga de deformación constante como lo muestra el grafico superior de la Figura 51, aunque dependiendo del comportamiento y composición de la mezcla, como método alternativo, la estabilidad Marshall también puede definirse como la carga obtenida, cuando la tasa de aumento de carga comienza a disminuir, de tal manera que la curva empieza a volverse horizontal, como se muestra en el gráfico inferior de la Figura 51. La magnitud de la estabilidad Marshall varía con el tipo de agregado, clasificación y tipo de asfalto, grado y cantidad.

Otros tipos de compactación pueden hacer que los especímenes tengan diferentes características de deformación por esfuerzo que los especímenes preparados por la compactación de impacto de Marshall.

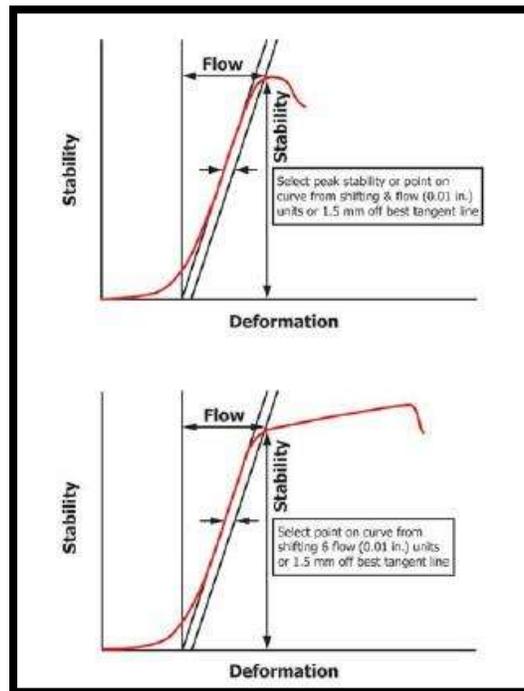


Figura 51. Determinación de la estabilidad y flujo para dos tipos de fallos de muestras. (ASTM D6927)

#### *4.5.5.2 Compactación de los especímenes a evaluar (Designación ASTM D6926).*

Las muestras de mezcla asfáltica compactada por este procedimiento se usan para las pruebas de estabilidad y flujo. También se realizan el análisis de densidad y vacíos en muestras para el diseño de la mezcla. Es necesario disponer del siguiente equipo:

Dispositivo para moldear las pastillas, consistente en una placa de base plana, con su molde y collar de extensión cilíndricos. El molde deberá tener un diámetro interior de 101.6 mm (4") y altura aproximada de 76.2 mm (3"); la placa de base y el collar de extensión deberán ser intercambiables, es decir, ajustables en cualquiera de los dos extremos del molde. Se recomienda disponer de tres (McGennis, 1994) moldes.

Martillo de compactación que consiste en un dispositivo de acero formado por una base plana circular y un pisón de  $4.545 \pm 0.009$  kg (10 lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de  $456.2 \pm 1.5$  mm (18").

Para la fabricación de los especímenes de bacheo, se emplea un compactador mecánico de impacto Marshall la velocidad de rotación de la base y la velocidad de soplado del martillo serán de 18 a 30 rpm y  $64 \pm 4$  golpes por minuto, respectivamente.

Se elaboran un número de 3 especímenes para cada grupo de evaluación (estabilidad inicial, saturada y pérdida de estabilidad por inmersión en agua), de 4" (101.6mm) de diámetro, la masa se ajustara para que la altura del espécimen sea cercana a los  $63.5 \pm 2.5$  mm, se puede hacer un espécimen adicional para previamente encontrar la masa correcta para alcanzar la altura como los mostrados en la Figura 52.



Figura 52. Especímenes para las pruebas de estabilidad y flujo.

La masa de los especímenes moldeados de laboratorio deberá cumplir el requisito de espesor de  $63.5 \pm 2.5$  mm. La estabilidad de los especímenes dentro de la tolerancia del grosor puede ser corregida en base al espesor.

#### 4.5.5.3 Análisis volumétrico de la mezcla.

Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. La propiedades volumétrica analizada para los especímenes Marshall de mezcla de bacheo con los prototipos de asfalto aditivado para comprender mejor su comportamiento a las pruebas de estabilidad son los vacíos de aire ( $V_a$ ), los vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse usando la siguiente ecuación:

$$V_a = 100x \left( \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right)$$

ec 13. Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada.

Dónde=

$V_a$ = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

$G_{mm}$ = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

$G_{mb}$ = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

Se realizaron los ensayos correspondientes para determinar la gravedad específica máxima de la mezcla ( $G_{mm}$ ) y la gravedad específica neta ( $G_{mb}$ ).

*Gravedad específica máxima (Designación ASTM D2041).*

Se determina la gravedad específica teórica máxima  $G_{mm}$  de la mezcla asfáltica en su estado suelto, para al menos dos contenidos de asfalto; para este caso se trabaja directamente con el contenido de asfalto a evaluar en las pruebas de estabilidad.

El Método de prueba aplicado es el siguiente:

Se prepara dos muestras de 2500 g para un tamaño nominal del agregado de 3/4" a 1", con la granulometría y contenido de asfalto establecidas para el pre diseño. Colocar la muestra en el picnómetro de ensaye determinar la masa de la mezcla, adicionar agua a la muestra a 25 °C y tapar el picnómetro. Colocar el picnómetro en el agitador mecánico, aplicar una presión al vacío con incremento gradual hasta alcanzar  $27.5 \pm 2.5$  mm de Hg, en un período de dos minutos. Continuar con la aplicación del vacío durante  $15 \pm 2$  minutos.

Retirar gradualmente la presión, suspender el picnómetro y la muestra en agua a  $25 \pm 1$  °C por  $10 \pm 1$  min y registrar el peso. Posteriormente registra la calibración del picnómetro sumergido en agua. Calcular la gravedad específica máxima de acuerdo con la ec 14.

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

ec 14. Gravedad específica máxima.

Dónde:

$G_{mm}$ = Gravedad específica máxima, con aproximación a 3 decimales.

A= Peso de la muestra

B= Calibración del picnómetro bajo el agua.

C= Peso sumergido del picnómetro más la muestra.

*Gravedad específica neta (Designación ASTM D2726 / ASTM D1188).*

Primero se debe determinar la absorción de la mezcla de acuerdo a la ec. 15, si el resultado es menor a 2%, se calcula con la ec. 16, de lo contrario se usa el siguiente procedimiento.

$$\%Abs = 100x \left( \frac{B - A}{B - C} \right)$$

ec 15. Porcentaje de absorción del espécimen.

$$Gmb = \frac{A}{B - C}$$

ec 16. Gravedad específica neta

Dónde:

%Abs= porcentaje de absorción.

Gmb= Gravedad específica neta.

A= Peso seco.

B= Peso saturado y superficialmente seco del espécimen.

C= Peso sumergido en agua.

El procedimiento a seguir como alternativa a los señalados en las normas ASTM D2726 y D1188, es el establecido para emplear el sistema CoreLok (Figura 53), este procedimiento requiere que un espécimen de asfalto compactado seco se coloque dentro de una bolsa y sellado al vacío con el CoreLok. La bolsa se coloca entonces bajo el agua y se determina un peso sumergido. El peso en el aire y el peso sumergido se pueden utilizar para calcular la densidad específica en masa de la muestra de asfalto.



Figura 53. Sistema CoreLok.

#### *4.5.5.4 Método de prueba estabilidad inicial y saturada (Designación ASTM D6927).*

Los especímenes deben tener el mismo tipo de agregado, calidad y clasificación; la misma fuente, grado y cantidad de asfalto. Además, los especímenes deben tener la misma preparación, es decir, temperaturas, enfriamiento y compactación.

Las muestras deben enfriarse a temperatura ambiente después de la compactación, durante el enfriamiento se deben colocar sobre una superficie lisa y plana. Medir el espesor de la muestra en 4 puntos diferentes de la pastilla para obtener un promedio del espesor.

Los especímenes se pueden acondicionar para probar tan pronto como alcancen la temperatura ambiente. Las pruebas se completarán en un plazo de 24 h después de la compactación. Llevar los especímenes preparados a la temperatura de  $60 \pm 1^\circ\text{C}$  por inmersión en el baño de agua durante 30 a 40 min, la variación de temperatura afectará los resultados de las pruebas.

Limpie a fondo las barras guía y las superficies internas de los segmentos de la cabeza de prueba antes de realizar la prueba (Figura 54). Lubrique las barras guía de manera que el segmento superior de la cabeza de prueba se deslice libremente

sobre ellas. Retire una muestra del agua, el horno o el baño acondicionado (en el caso de un baño de agua, retire el exceso de agua con una toalla) y colóquela en el segmento inferior del cabezal de prueba. Coloque el segmento superior de la cabeza de prueba en la muestra y coloque el conjunto completo en posición en la máquina de carga. El tiempo transcurrido entre la retirada de las muestras de ensayo del baño de agua y la determinación de la carga final no debe exceder de 30 s.



Figura 54. Equipo de prueba de estabilidad y flujo.

Aplicar la carga a la muestra por medio de la velocidad constante de movimiento del gato de carga o de la cabeza de la máquina de carga de  $2,00 \pm 0,15$  plg/min ( $50 \pm 5$  mm / min) hasta que se libera el dial o la carga comienza a disminuir. Detenga el ensayo cuando la celda de carga indique que la tasa incremental de carga Constante de la deformación, ha comenzado a disminuir. El valor de flujo se registra habitualmente en unidades de 0,25 mm (0,01 pulgadas).

La Estabilidad Marshall se define como la carga correspondiente al flujo, los valores individuales y el promedio de la estabilidad Marshall inicial y saturada se registran (sin corregir y corregir si es necesario) a los 10 lbf (50N) más cercanos.

#### 4.5.5.5 Resultados de las pruebas (Designación ASTM D2041, ASTM D1188 y D6927).

Tabla 45. Gravedad específica teórica máxima para el pre diseño 2.

Muestra	1	2
Masa de la muestra, al aire (g)	1494.3	1500.1
Picnómetro + muestra, sumergido (g)	2245.1	2250.6
Calibración del picnómetro (g)	1342.3	
Gravedad específica teórica máxima, Gmm	2.526	2.535
Gravedad específica teórica máxima promedio, Gmm	2.531	

Tabla 46. Análisis volumétrico de los especímenes para el pre diseño 2.

Especímen	Gravedad específica neta, Gmb	% Va	Altura del espécimen (mm)
1	2.025	20.0	63.5
2	2.019	20.2	63.5
3	2.022	20.1	63.6
4	2.022	20.1	62.5
5	2.014	20.4	63.4
6	2.011	20.5	64.1
7	2.020	20.2	63.6
8	2.013	20.4	63.8
9	2.028	19.9	63.9

Tabla 47. Resultados de estabilidad del pre diseño 2.

Condición	Especímen	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Estabilidad promedio (kg)	Flujo
Inicial	3	586.9	266.4	256.1	6.04
	5	553.4	251.2		6.1
	6	551.8	250.5		5.56
Saturada	1	532.2	241.6	251.9	8.22
	2	587.8	266.8		9.97
	10	544.5	247.2		8.64



Figura 55. Especímenes ensayados en condición inicial.



Figura 55.b. Especímenes ensayados en condición saturada.

#### 4.5.6 Pérdida de estabilidad por inmersión de agua de la mezcla.

##### 4.5.6.1 Definición y alcance.

De acuerdo con el manual de la SCT M-MMP-4-05-042 el objetivo de la prueba es determinar la reducción en la estabilidad que se produce en una mezcla asfáltica por inmersión en agua. La prueba consiste en ensayar mediante compresión simple varios especímenes de prueba, unos en condiciones normales y otros después de su inmersión en agua, fabricados con materiales pétreos de granulometría previamente definida y medir la diferencia de resistencias entre especímenes en ambas condiciones.

#### 4.5.6.2 Método de prueba (Designación M-MMP-4-05-042).

La preparación de los especímenes en este caso se hará con el procedimiento de compactación y mezclado definido para las mezclas en frío de bacheo con asfalto aditivado que se mencionaron específicamente para este estudio. De los especímenes elaborados se selecciona un grupo de 3 para colocarse en inmersión donde se mantienen en agua durante 4 días (Figura 56).



Figura 56. Tinas con control de temperatura para inmersión en agua.

Transcurrido el período de inmersión, los especímenes se sacan del tanque, se prueban a compresión simple y se registran las resistencias a la ruptura. Los resultados se comparan contra los especímenes probados en condiciones normales (iniciales), con el mismo contenido de asfalto, registrando la pérdida por estabilidad dada por la ec. 17.

*Calculo.*

$$P_{INM} = \left( \frac{R - R_s}{R} \right) \times 100$$

ec 17. Pérdida de estabilidad por inmersión en agua.

Dónde:

$P_{INM}$ = Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, en porcentaje.

R= Resistencia del espécimen en condiciones normales.

$R_s$ = Resistencia del espécimen sumergido.

#### 4.5.6.3 Resultados de las pruebas (Designación M-MMP-4-05-042).

Tabla 48. Pérdida de estabilidad por inmersión en agua para el pre diseño 2.

Condición	Espécimen	Estabilidad (kg)	Estabilidad promedio (kg)	Flujo	Estabilidad condición normal (kg)	Pérdida de estabilidad
Inmersión en agua por 4 días	6	205.4	206.1	6.04	256.1	20%
	8	196.3		6.1		
	9	216.7		5.56		



Figura 57. Especímenes ensayados después de la inmersión en agua.

#### 4.5.7 Desprendimiento por ebullición.

##### 4.5.7.1 Definición y alcance.

Uno de los principales factores para asegurar la calidad de una mezcla de bacheo en frío, es la resistencia a la acción del agua sobre la mezcla, directamente en la adherencia entre asfalto-agregado, como un método para evitar el fenómeno de stripping, la mezcla sin compactar debe de ser sometida a condiciones extremas, como en el caso de esta prueba.

Lo importante de esta característica, es que nos puede llegar a asegurar un buen desempeño de la mezcla durante acciones de bacheo bajo cualquier circunstancia y clima, como lo es en épocas de lluvia o con baches llenos de agua, uno de los objetivos en el comportamiento adecuado de la mezcla.

De acuerdo con la norma ASTM D3625, esta prueba resulta útil como indicador de la susceptibilidad relativa del agregado recubierto con asfalto al agua, pero no debe utilizarse como una medida del rendimiento en el campo porque no se ha establecido dicha correlación. Si existe la pérdida de adherencia Debido al agua, se deben realizar ensayos con otros procedimientos para evaluar adicionalmente la mezcla.

#### 4.5.7.2 Método de prueba (Designación ASTM D3625).

Para cada muestra analizada vierta el agua destilada en un recipiente limpio de forma que el recipiente esté aproximadamente medio lleno (al menos 500 ml) y caliéntelo hasta que hierva.

Con un equipo apropiado coloque aproximadamente 250 g de la mezcla de agregados que pasan la malla  $\frac{1}{2}$ " (12.5mm) y retenidos en la  $\frac{3}{8}$ " (9.5mm) recubiertos de asfalto en el agua hirviendo mientras el contenedor está expuesto a la fuente de calor. Lleve el agua a ebullición y mantener el punto de ebullición durante 10 min  $\pm$  15 segundos (Figura 58).



Figura 58. Prueba de ebullición a pre diseño 2.

Al cabo de 10 minutos, retire el recipiente de la fuente de calor. Enfriar a temperatura ambiente. Observar visualmente el agregado para revestimiento de asfalto retenido. (Ver Figura 59)

#### 4.5.7.3 Resultados de la prueba (Designación ASTM D3625).

Tabla 49. Desprendimiento por ebullición para el pre diseño 2.

Tamaño de muestra (g)	% Cubrimiento en las partículas	Masa (g)	Partículas %
257.2	<90	251	97.6
	>90	6.2	2.4



Figura 59. Partículas después la prueba de ebullición.

#### 4.5.8 Drene.

##### 4.5.8.1 Definición y alcance.

Una muestra de la mezcla de asfalto a ensayar se prepara en el laboratorio. La muestra se coloca en una cesta de alambre que se coloca sobre una placa u otro recipiente adecuado de masa conocida. La muestra, cesta y placa o recipiente se colocan en un horno durante una hora a una temperatura preseleccionada. Al cabo de una hora, la cesta que contiene la muestra se retira del horno junto con la placa o recipiente y se determina la masa de la placa o recipiente que contiene el material escurrido, si existe. Entonces se calcula la cantidad de drenaje.

Este método de ensayo puede usarse para determinar si la cantidad de drenaje medida para una mezcla de asfalto dada está dentro de los niveles aceptables especificados. El ensayo proporciona una evaluación del potencial de drenaje de una mezcla de asfalto durante el mezclado y / o durante la producción de campo.

#### 4.5.8.2 Método de prueba (Designación D 63909).

Para cada mezcla probada, las características de drenaje se determinarán a dos temperaturas diferentes. Las dos temperaturas serán la temperatura prevista de producción de la planta, así como 10 ° C arriba. Para cada temperatura, se probarán muestras duplicadas. Así, para una mezcla de asfalto, se probará un mínimo de cuatro muestras.

Colocar en recipientes separados para cada muestra de ensayo la cantidad de cada fracción de tamaño requerida para producir muestras de mezcla completas que tengan una masa de  $1200 \pm 200$  g como lo muestra la Figura 60. Las fracciones de agregados se combinarán de manera que la mezcla agregada resultante tenga la misma gradación que la fórmula de mezcla de trabajo. Colocar las muestras de agregado en un horno y calentar a una temperatura que no supere la temperatura establecida.



Figura 60. Canastilla y muestra para prueba de drene.

La cantidad de ligante asfáltico deberá ser la establecida en el proyecto.

Pesar la cesta de alambre vacía y determine la masa de la cesta de alambre más la muestra a 0,1 g más cercano. Determinar y registrar la masa de una placa u otro recipiente adecuado a 0,1 gramos más cercano a temperatura ambiente. Coloque el cesto en la placa o recipiente y coloque el conjunto en el horno a la temperatura indicada en proyecto y otra 10 °C arriba durante  $1 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ .

Después de que la muestra haya estado en el horno durante  $1 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$ , retire la cesta y el recipiente del horno. Dejar enfriar a temperatura ambiente. Determine y registre la masa de la placa o recipiente más el material drenado a 0,1 g más cercano como se observa en la Figura 61.

### Cálculo

$$\%Drene = \left[ \frac{(D - C)}{(B - A)} \right] \times 100$$

ec 18. Porcentaje de muestra que se drena.

Dónde:

%Drene= porcentaje de mezcla que se drena al 0,1% más cercano.

A = masa de la cesta de alambre vacía, canastilla

B = masa de la canasta de alambre y de la muestra.

C = masa del recipiente de captura vacío.

D = masa del recipiente de captura más el material drenado.

### 4.5.8.3 Resultados de la prueba (Designación D 63909).

Tabla 50. Porcentaje de drene para mezcla pre diseño 2.

Muestra	1	2	3	4
Temperatura °C	140		150	
Canastilla (g)	420.1	419.6	420.1	419.6
Canastilla + mezcla (g)	1438.5	1448.7	1480.8	1445.9
Recipiente (g)	400.1	402.3	400.1	402.3
Recipiente + drene (g)	400.1	402.3	400.4	403.4
Material drenado %	0	0	0	0.1



Figura 61. Resultado de la prueba al pre diseño 2, 10 °C arriba de la temperatura de premezclado.

#### 4.5.9 Desempeño de la mezcla de granulometría densa.

Una vez definido el pre diseño con el mejor comportamiento en la mezcla de bacheo, se procede a elaborar una mezcla con la granulometría densa establecida para este estudio con los materiales del banco La Letra, de proporcionamiento 60% Grueso – 40% Fino. Los resultados para analizar el desempeño y características de la mezcla se presentan en las Tablas 51, 52 y 53.

Tabla 51. Pruebas de aceptación de la mezcla densa.

Evaluación	Espécimen
Trabajabilidad kg/cm <sup>2</sup>	0.63
Raveling %	4

Tabla 52. Análisis volumétrico de la granulometría densa en base al pre diseño 2.

Espécimen	Gravedad teórica (Gmm) promedio.	Gravedad específica neta , Gmb	% Va	Altura del espécimen (mm)
1	2.534	1.978	21.9	64
2		1.988	21.5	64.2
3		1.974	22.1	64.2
4		1.963	22.5	65.7
5		1.978	21.9	64.7
6		1.973	22.1	65.1

Tabla 53. Prueba de estabilidad a la mezcla densa en base al pre diseño 2.

Condición	Espécimen	Estabilidad (lb)	Estabilidad (kg)	Estabilidad promedio (kg)
Inicial	1	672.4	305.3	294.2
	4	623.5	283.1	
	5	648.2	294.3	
Saturada	2	543.33	246.7	263.4
	3	579.37	263.0	
	6	617.74	280.5	

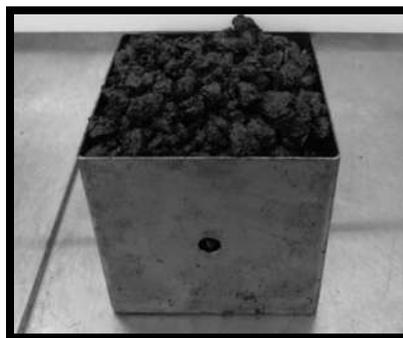


Figura 62. Prueba de trabajabilidad a la mezcla densa.



Figura 63. Prueba de raveling a la mezcla densa.

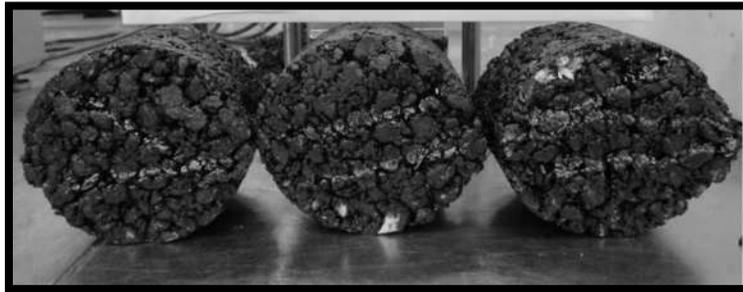


Figura 64. Ensaye de estabilidad inicial (seca) de la mezcla densa.

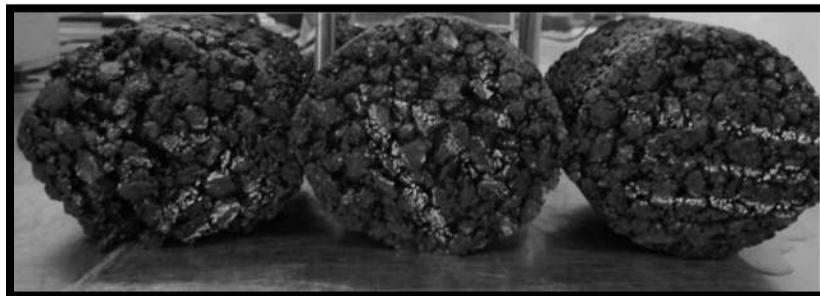


Figura 65. Ensaye de estabilidad satura en mezcla densa.

## **Capítulo 5. Análisis de los resultados.**

### **5.1 Generalidades.**

Recordando que el diseño y comportamiento esperado en la mezcla de bacheo es que esta sea manejable, almacenable y con una buena estabilidad en campo ante las acciones del tráfico. La rigidez o trabajabilidad de una mezcla está influida por una serie de factores que incluyen el contenido de asfalto de la mezcla y la temperatura a la que se coloca en el campo. Una mezcla con un alto contenido de asfalto y colocada a temperaturas más altas sería relativamente más trabajable y viceversa. Otra preocupación específica para las mezclas almacenadas es la evaporación de los volátiles en el asfalto aditivado y el fenómeno de drene. Ambos generan una mezcla más rígida, reduciendo así la trabajabilidad de la mezcla. Otros factores que afectan a la trabajabilidad incluyen la gradación de agregados y la adherencia entre el ligante y el agregado. A continuación se presenta un análisis de los resultados de los ensayos en laboratorio que garanticen el objetivo y la calidad del asfalto aditivado en la mezcla.

### **5.2 Propiedades y caracterización del material pétreo.**

La Tabla 54 engloba los resultados de la evaluación a los agregados pétreos del banco de materiales Tonalá, utilizados para la elaboración de mezclas de bacheo, además de una comparación contra las especificaciones establecidas en las normativas vigentes en México para la elaboración de mezclas de granulometría densa, como las de la SCT y las normas empleadas en el estudio de la mezcla de bacheo con asfaltos aditivados.

Tabla 54. Evaluación de agregados pétreos, banco Tonalá.

Ensayo	Normativa			Especificación			Resultado de la prueba
	SCT	ASTM	AASHTO	SCT	ASTM	AASHTO	
PVSS agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )		C29			---		1540.3
PVSS agregado fino (kg/m <sup>3</sup> )		C29			---		1433.6
Densidad del agregado grueso, mín.	M-MMP-4-04-003	C127		2.4	---		2.737
Densidad del agregado fino, mín.	M-MMP-4-04-003	C128		2.4	---		2.698
Suma de Partículas planas y alargadas %, máx.	M-MMP-4-04-005	D4791		40, Relación 2:1	10, Relación 5:1		9.4
Caras Fracturadas %, mín.		D5821			90		88.7
Desgaste de los Ángeles %, máx.	M-MMP-4-04-006	C131		35	30		12
Microdeval %, máx.			T327			18	9
Equivalente de arena %, mín.	M-MMP-4-04-004	D2419		50	50		64
Azul de metileno mg/g, máx.	AMAAC RA 05/2008			15			14
Angularidad del fino, mín.			T 304			40	49

Como se observa en la tabla 54, los resultados en la mayoría de los ensayos generan valores adecuados a la caracterización de los agregados respecto a los límites y especificaciones de las normas; en el caso de la forma de la partícula, para la clasificación de partículas planas y alargadas, la norma ASTM es más exigente que la normativa de la SCT, aun así el resultado de la prueba es satisfactorio, y en el caso de las caras fracturas el resultado de la prueba tiene un porcentaje mínimo debajo de la exigencia de la norma ASTM, por lo que se puede considerar aceptable sin que éste intervenga significativamente en el comportamiento de la mezcla. En el caso de la prueba de azul de metileno, el valor que resultad del fino de la arena de Tonalá se encuentra muy cerca del límite máximo recomendado por el protocolo AMAAC para el diseño de mezclas densas, aun así cumple con los estándares de calidad en el filler.

### 5.2.1 Análisis granulométrico.

La gradación de los materiales pétreos es uno de los factores principales para el desempeño apropiado de la mezcla de bacheo, no se cuenta con una granulometría establecida para el diseño de mezclas en frío de bacheo, sin embargo, existen recomendaciones que ayudaron a definir la granulometría, de acuerdo con características como forma y tamaños de los agregados utilizados y las exigencias del proyecto.

El resultado del análisis granulométrico de los materiales, define el siguiente comportamiento para diferentes combinaciones de agregados, estableciendo una composición del 60% de Grava (grueso) y 40% de Arena (fino), que de acuerdo con los técnicos de laboratorio SMM y a base a la experiencia, se debe buscar un equilibrio y un buen comportamiento en conjunto de las fracciones de agregados pétreos, habitualmente se pueden establecer porcentajes de este estilo que desempeñan un buen comportamiento en mezcla. Las siguientes Figuras de la 66 a la 68 grafican el comportamiento de los agregados con esta composición del 60-40%.

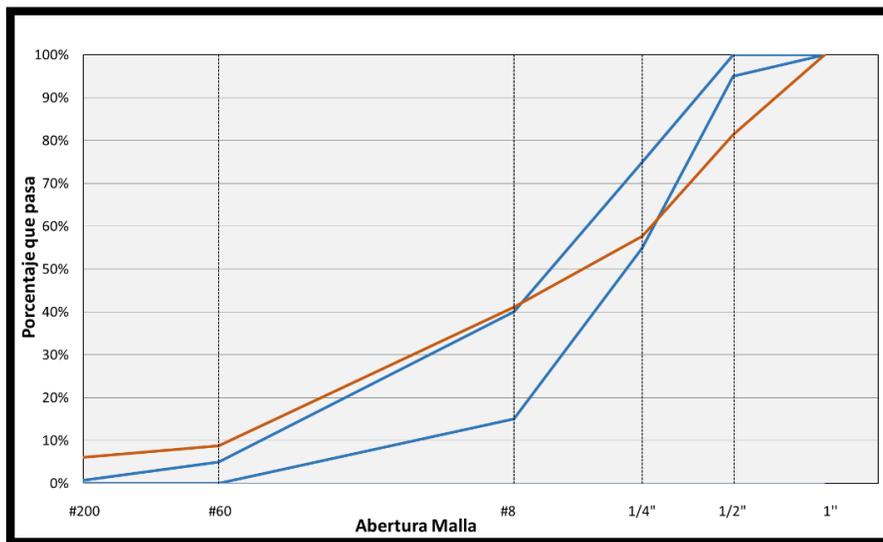


Figura 66. Gráfica de granulometría gruesa, 60% agregado grueso 40% agregado fino, banco Tonalá.

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

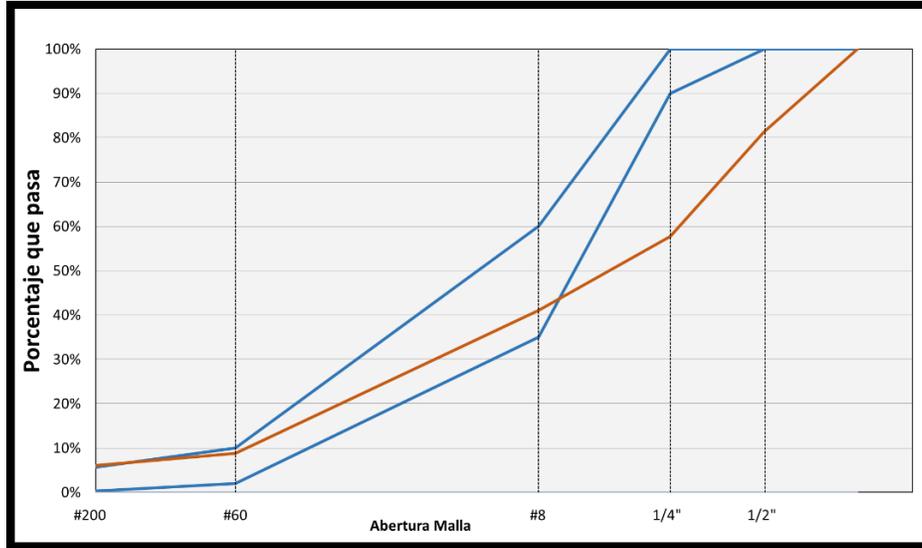


Figura 67. Gráfica de granulometría fina, 60% agregado grueso 40% agregado fino, banco Tonalá.

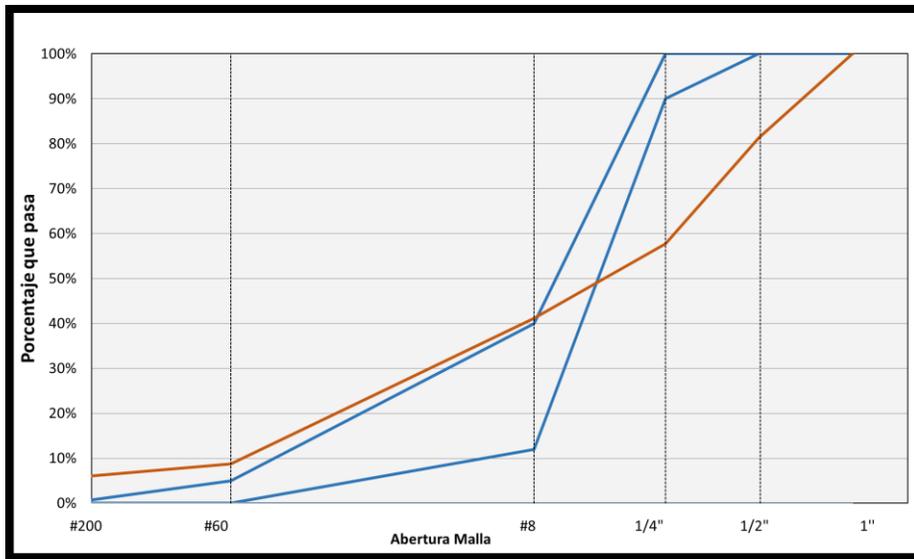


Figura 68. Gráfica de granulometría intermedia, 60% agregado grueso 40% agregado fino, banco Tonalá.

Como lo muestran las figuras de la 66 a la 68, el comportamiento que tienen los agregados con la proporción de los materiales pétreos de 60% grueso más 40% finos no es el adecuado; como resultado de éste y diferentes proporcionamientos no se logró tener el control de la graduación de los materiales para mantenerse dentro de los límites establecidos en las granulometrías de bacheo, resultado de

este análisis se debería optar por hacer cambios en los materiales, como lo es seleccionar un material diferente, añadir una fracción de material adicional como un sello, o cambiar de banco de origen, para cumplir con los estándares de la granulometría.

Se decretó la siguiente solución para fines del estudio de la mezcla de bacheo con asfaltos aditivados: continuar con los materiales evaluados, omitiendo el comportamiento granulométrico que tienen, y definiendo los porcentajes de proporción 60% material grueso y 40% material fino, estableciendo un control sobre los porcentajes de material pétreo de la granulometría (% que pasa) equivalente a los del comportamiento recomendado mostrado en las Figuras 25,26 y 27 de las granulometrías gruesa, fina e intermedia respectivamente, y que se muestran en la Tabla 55.

Tabla 55. Porcentajes de material que pasa para control de la propuesta granulométrica 60%Grueso-40%Fino.

Granulometría		Gruesa	Fina	Intermedia
Tamaño abertura de malla		% Que pasa	% Que pasa	% Que pasa
mm	plg			
25	1"	100%	100%	100%
12.5	1/2	98%	100%	100%
6.25	1/4	65%	95%	95%
2.36	No. 8	27%	48%	26%
0.25	No. 60	3%	6%	3%
0.075	No. 200	0%	3%	0%

El beneficio de tener el control en las granulometrías y los porcentajes que pasan en cada malla, es que la granulometría propia del material no será un factor que intervenga en el desempeño de las mezclas de bacheo, por el contrario, prevalece el estudio y análisis de una manera precisa sobre el comportamiento de las granulometrías de bacheo propuestas para el proyecto.

Para la granulometría densa, se hizo el mismo proporcionamiento de los materiales 60% y 40% para el grueso y fino respectivamente, en este caso el proporcionamiento cumple con los puntos de control establecidos para una granulometría de TN 3/4", su comportamiento se observa en la Figura 69.

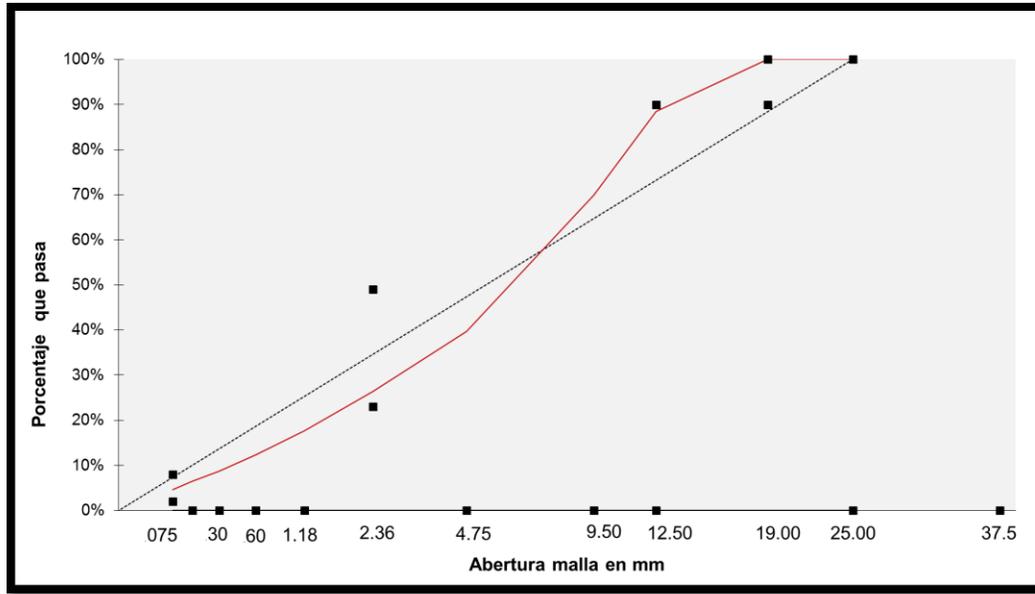


Figura 69. Gráfica de granulometría densa 60%Grueso-40%Fino, banco la Letra.

Es importante mencionar que para su aplicación en campo no es recomendable la modificación o alteración de la granulometría proveniente de origen, debido a que tener un control estricto en las proporciones de los tamaños significaría elevar el costo de obtención del material pétreo.

### 5.2.2 Trabajabilidad.

La trabajabilidad de la mezcla durante el almacenamiento y antes de su colocación es uno de los factores más importantes para determinar su desempeño adecuado. Es por eso el análisis de trabajabilidad tomado como el primer indicador crítico de una buena mezcla de bacheo, la Figura 70 y 71 muestran una comparación del comportamiento de los pre diseños, anteriormente se observaban los resultados en la Tabla 42 y la 43.

Las variaciones durante el proceso de aplicación de la prueba pueden afectar los valores obtenidos, como el acomodo de la mezcla en la caja de trabajabilidad o la velocidad y fuerza de penetración del penetrómetro. La adherencia cuidadosa al procedimiento estándar disminuirá la probabilidad de diferencias en los parámetros de la prueba.

La prueba, como lo indica el método AASHTO TP43 - 94, se evalúa a una temperatura de 4 °C, la razón es establecer en la mezcla la situación menos favorable en la que la trabajabilidad se vería afectada, esto producto de la relación viscosidad vs temperatura de los ligantes asfálticos, a menor temperatura la viscosidad se ve incrementada, por el contrario a mayor temperatura la viscosidad del asfalto disminuye reblandeciéndolo.

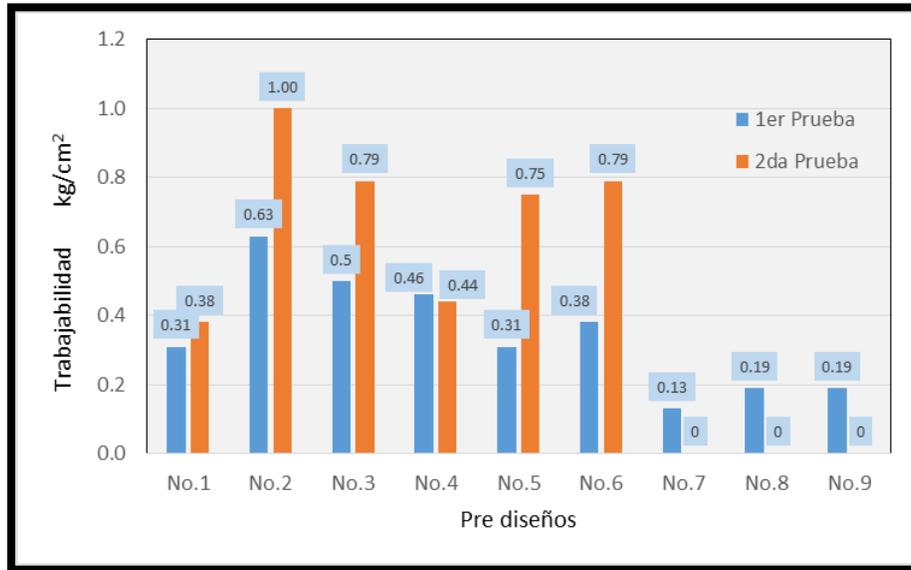


Figura 70. Análisis de la trabajabilidad después del almacenamiento, Prototipo 1.

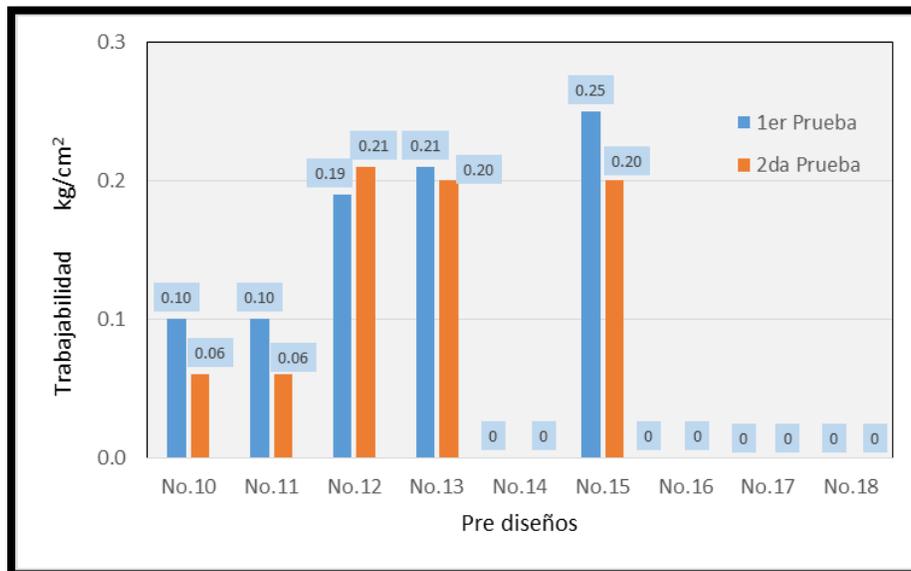


Figura 71. Análisis de la trabajabilidad después del almacenamiento, Prototipo 2.

Como se observa en la Figura 70, el asfalto aditivado Prototipo 1, presenta resistencias mayores ( $\text{kg/cm}^2$ ) a la prueba de trabajabilidad que en comparación con los prediseños elaborados que contienen el Prototipo 2, concluyendo que el Prototipo 2 añade una mayor manejabilidad a la mezcla, considerando que los prediseños de cada asfalto aditivado tienen la misma dosificación para poder hacer un análisis comparativo de los resultados.

También se puede observar en las figuras, prediseños con una variación inusual si se considera que la trabajabilidad aumenta de acuerdo con el tiempo de almacenamiento, como en el caso del pre diseño 4 y el 15, en donde disminuye la trabajabilidad después de un cierto tiempo de almacenamiento, esto puede ser el resultado de las variantes que existen al elaborar la prueba como los que se mencionaron anteriormente, un acomodo diferente de partículas y una aplicación diferente del penetrómetro en el ensaye.

Algunos pre diseños, específicamente los que contenían el asfalto aditivado Prototipo 2, presentan una trabajabilidad de cero (0)  $\text{kg/cm}^2$ , por lo que después de algunas evaluaciones se descartaron para volver a ensayar, este comportamiento se presentó más con las granulometrías finas e intermedias, debido a que un tamaño más fino de los agregados pétreos, aumenta la trabajabilidad de la mezcla.

Cabe mencionar que la trabajabilidad de los pre diseños que contienen asfalto Prototipo 1 presentan resistencias menores a  $1.00 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que el Prototipo 2 presenta resistencias aun menores con valores inferiores a  $0.30 \text{ kg/cm}^2$ , ambas resistencias se consideran de acuerdo a la norma AASHTO TP 43-94 como mezclas con una trabajabilidad muy buena, ya que la norma establece una especificación con un límite máximo de  $3.00 \text{ kg/cm}^2$  en la resistencia para decir que presenta una manejabilidad pobre a  $4^\circ\text{C}$ . Por lo que cualquier asfalto se considera apto para el estudio y cumple con las expectativas de almacenaje.

Finalmente con los resultados de las pruebas se seleccionan los mejores prediseños con la trabajabilidad más alta para continuar con el estudio y pasar a las pruebas de desempeño de la mezcla.

### 5.2.3 Raveling

Raveling es una pérdida del agregado de la superficie de la mezcla de bacheo debido a la cohesión inadecuada dentro de la mezcla. El desprendimiento suele ser causado por la pérdida de adherencia entre el ligante y el agregado, el exceso de finos en la mezcla, la separación del asfalto y del agregado, la forma del agregado inadecuado y la compactación deficiente.

Los resultados de los prediseños seleccionados en la prueba de trabajabilidad, aquellos con la mejor trabajabilidad, no presentaron la mejor cohesión en la mezcla y comportamiento en la prueba de desempeño como se observan los valores en la Tabla 44, pre diseños que contienen el asfalto Prototipo 2, asfalto que otorgaba a la mezcla la mayor trabajabilidad. Incluso fue necesario repetir la prueba con un segundo espécimen para corroborar el resultado, la Tabla 56 muestra el promedio de los resultados de la prueba.

Tabla 56. Resultado de Raveling.

Pre diseño	Trabajabilidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Raveling promedio %
1	0.38	11.7
11	0.1	15.6
14	0	12.6
17	0	15.1

La norma ASTM D 7196, específica un máximo de 5% de masa perdida durante los 15 minutos de abrasión en la prueba. Se define que el mejor desempeño de la mezcla, es el del pre diseño con la trabajabilidad menor, en este caso el pre diseño 1, por lo que se retoma la prueba de trabajabilidad para seleccionar la mezcla con la trabajabilidad más pobre, pero que cumpla con la especificación de la norma AASHTO TP43-94 de la resistencia máxima de 3 kg/cm<sup>2</sup>.

Se seleccionó el pre diseño número 2, con el asfalto prototipo 1, con la granulometría gruesa, parámetros que se esperarían definen una mezcla de bacheo pobre en trabajabilidad, aun así presenta una trabajabilidad aceptable de 1 kg/cm<sup>2</sup>.

El resultado fue encontrar una mezcla con una buena cohesión, con una pérdida de masa del 2% en la prueba de Raveling, resultado dentro de la especificación de la norma ASTM.

#### 5.2.4 Estabilidad Marshall inicial, saturada y pérdida por inmersión en agua.

Las muestras elaboradas para el estudio de las mezclas de bacheo con asfalto aditivado, se compactaran a temperatura ambiente 24 horas después del mezclado para simular la forma de aplicación en campo, sin la necesidad de aplicar ninguna fuente de calor que facilite la manejabilidad de la mezcla, aplicando 75 golpes por cara del espécimen.

Algunos estudios de mezclas en frío de bacheo recomiendan el curado de la mezcla después de su elaboración y compactar a 60°C en laboratorio para simular el tiempo de almacenamiento después de la fabricación de la mezcla, no obstante, se tomó la decisión de que durante la fabricación en planta no se tendrá ningún proceso de curado para la mezcla, para el caso del envejecimiento de la mezcla durante su almacenamiento, curar la mezcla y compactar a temperaturas mayores a las ambientales haría que la mezcla tenga una mejor consistencia y cohesión aumentando la estabilidad y resistencia a la prueba Marshall, al aplicarlo en laboratorio los resultados de la evaluación de estabilidad se verían afectados a favor de la estabilidad, por lo que hacerlo sin el proceso de curado la evaluación se aplicaría a la mezcla de bacheo suave y manejable, condición que se presentará en un caso crítico cuando no se obtenga algún curado durante el almacenamiento de la mezcla, comportamiento desfavorable ante cargas y esfuerzos aplicados a la mezcla de bacheo como lo pueden ser las cargas vehiculares.

Los resultados obtenidos de las pruebas de estabilidad para el pre diseño 2 mostrados en las Tablas 47 y 48, presentan valores de estabilidad entre 200 y 260 kg, como se mencionó, no existe una especificación o normativa para este parámetro en el caso de las mezclas de bacheo frío con asfalto aditivado, dentro de las investigaciones a mezclas similares se establece el valor de estabilidad mínima de 350 kg para considerar el buen desempeño de la mezcla, valor que adopto SMM

para comparar la calidad de la mezcla, por otra parte, no se puede considerar que exista un análisis comparativo respecto a este valor, debido a que el proceso de elaboración y compactación de la mezcla no son similares como se mencionó con anterioridad.

Esta situación quedará por definirse si el valor es considerado aceptable o no, hasta establecer o contar con una especificación de forma directa para este tipo de mezcla; existe la opción estudiar el comportamiento de la mezcla en campo antes de hacer el dictamen de que la mezcla no cuenta con el desempeño adecuado, en base al valor de los estudios mencionados, para de esta manera determinar si los valores de estabilidad obtenidos en laboratorio satisfacen las necesidades y exigencias *in situ*, opción que se encuentra fuera de los alcances para éste estudio.

En el caso de la pérdida de estabilidad por inmersión en agua la SCT marca en el manual M-MMP-4-05-042 como 25% máximo de pérdida, el resultado de la prueba del pre diseño 2 es del 20% de pérdida de estabilidad, por lo que se considera dentro de los parámetros de la especificación, definiendo la mezcla como aceptable.

### 5.2.5 Compatibilidad asfalto - agregado.

Durante las pruebas para determinar la compatibilidad entre el Prototipo 2 y los materiales pétreos del banco de Tonalá, se presentaron los resultados en las Tablas 49 y 50.

Para el ensaye de desprendimiento por ebullición el 97.6 % de las partículas de la fracción gruesa del agregado pétreo presenta una buena adherencia del asfalto en más del 90% de cubrimiento, la SCT en su norma N-CMT-4-05-003 de calidad de las mezclas asfálticas, específica un 90% mínimo de partículas cubiertas para pruebas de desprendimiento en mezclas no compactadas, por lo que se define que la adherencia es aceptable entre el agregado y el Prototipo 1 de asfalto aditivado.

La prueba de drene no presento escurrimiento de la mezcla a la temperatura de mezclado de 140 °C, para la temperatura 10°C arriba de la de premezclado, se obtuvo un drene de 0.1% de la mezcla no compactada, al igual que en el ensaye de desprendimiento por ebullición la norma N-CMT-4-05-003 específica un máximo de

Estudio del comportamiento de asfaltos aditivados para la elaboración de mezclas para bacheo.

0.3% de material drenado a temperaturas mayores a las de producción, por lo que se concluye un buen desempeño de la mezcla.

Finalmente se hace un compendio de los resultados de las pruebas de desempeño en la Tabla 57, para el pre diseño 2, con las especificaciones requeridas para aprobar su comportamiento. Las características del pre diseño 2 son:

- Asfalto aditivado: Prototipo 1.
- Granulometría de bacheo: GRUESA
- Proporción de materiales Pétreos: 60% Grueso – 40% Fino.
- Contenido de asfalto AC-20 (pre mezclado): 2%
- Contenido de asfalto aditivado: 3%

Tabla 57. Desempeño del Prototipo 2 de asfalto aditivado en granulometría gruesa (Pre diseño 2).

Evaluación	Designación	Especificación	Resultado del ensaye en laboratorio
Aceptación de la mezcla			
Trabajabilidad, máx. (kg/cm <sup>2</sup> )	AASHTO TP43-94	3	1
Desempeño de la mezcla			
Raveling, máx. %	ASTM D7196	5	2
Estabilidad Marshall inicial y saturada, mín. (kg)*	ASTM 6927	350*	256 - 251
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua, máx. %	M-MMP-4-05-042	25	20
Compatibilidad (Asfalto-agregado)			
Desprendimiento por ebullición, % mín. de partículas cubiertas.	ASTM D3625	90	97
Drene, máx. %	ASTM D6390	0.3	0.1

\*El valor de estabilidad Marshall mínimo de 350 para la especificación de la norma ASTM 6927, es un valor propuesto en base a estudios previos de mezclas de este tipo, por lo que es aceptable la alteración del valor, acorde al buen desempeño de la mezcla.

Realizando el análisis comparativo de los resultados entre la granulometría de bacheo y la granulometría densa, expuestos en las tablas de la 51 a la 53, se observa un buen desempeño de la mezcla, similar al de la mezcla de bacheo, pero esta adquiere una mejor estabilidad por el tamaño superior de sus partículas gruesas, mismas que rigen el proporcionamiento de la mezcla (60% de grueso y 40% de finos), mismo proporcionamiento utilizado para la granulometría de bacheo, presenta un porcentaje de vacíos en la mezcla mayor en compactada.

En el caso de la prueba de raveling, la cohesión que existe en la mezcla es menor a la de la mezcla de bacheo con granulometría gruesa, esto puede ser el resultado de la falta de asfalto en la mezcla, debido a la densidad y absorción del material y al número de partículas de agregado que demandan un porcentaje mayor al 5% de asfalto.

La trabajabilidad adquirida por el asfalto aditivado (Prototipo 2) sigue siendo buena, por lo que la mezcla se considera con un mejor desempeño que la que utiliza las granulometrías de bacheo.

El problema que puede existir en la mezcla es durante la vida de almacenamiento, esta puede perder más fácil la calidad de trabajabilidad por la pérdida de aditivos por el porcentaje de vacíos en la mezcla, por lo que sería necesario trabajar un pre diseño con un contenido de asfalto mayor y analizar si no pierde la buena estabilidad presente en la mezcla.

## **Conclusiones y recomendaciones.**

México cuenta con una longitud aproximada de 300,000 km de autopistas, carreteras y caminos rurales las cual constituye un factor fundamental y detonante en el desarrollo del país. Esta red de vialidades requiere de diversas acciones para lograr mantenerla operando con adecuados niveles de servicio y brindar a los usuarios un servicio confortable y seguro.

Es importante mencionar que las evaluaciones y el diseño del análisis de los asfaltos aditivados se hicieron en condiciones con un ambiente controlado dentro de las instalaciones del laboratorio técnico de la empresa Sem Materials México, por lo que las condiciones ambientales externas como temperaturas altas pueden ser factor para alterar el desempeño y comportamiento de la mezcla en frío para bacheo con asfaltos aditivados.

Como no se encuentra establecido un diseño para este tipo de mezclas, fue de gran utilidad conocer el uso esperado para la mezcla, y dependiendo de ello establecer un diseño en base a las variantes que establece este proyecto, como lo es el empleo de diferentes granulometrías, asfaltos y dosificaciones.

Actualmente en México no se tiene una norma que rige para este tipo de mezclas, pero tampoco en otros países existen las especificaciones de calidad con la que debe cumplir la mezcla de bacheo, es por eso que se propusieron valores con los que se trabajaron en el estudio, como la estabilidad, por lo que es recomendable pasar a la evaluación de la mezcla a su desempeño en campo para comprobar si es adecuado el nivel de la especificación propuesta o será necesario modificarla acorde a desempeño y resultados obtenidos.

Parte importante del diseño es el agregado pétreo, un agregado de grueso denso se elige con más frecuencia cuando la estabilidad es de consideración principal. Debe hacerse una elección diferente al seleccionar la forma de los agregados para la mezcla en frío de bacheo. Para una buena trabajabilidad, se evitan los agregados muy angulares, pero se desean los buenos agregados angulosos de superficie rugosa para una mejor estabilidad.

Inmediatamente después de la compactación, la mezcla debe ser estable y no susceptible al desplazamiento, aunque no exista el curado total del asfalto aditivado. Por lo tanto, la estabilidad inmediatamente después de la compactación se obtiene principalmente mediante una atención cuidadosa a los agregados.

El tipo y contenido de ligante empleado en el diseño de la mezcla es primordial para definir el comportamiento, el contenido óptimo puede basarse en la estabilidad o en la trabajabilidad esperada. Menos asfalto aditivado proporciona una mezcla con resistencias mayores en estabilidad, si la mezcla es excesivamente rígida, es extremadamente difícil de trabajar y puede resultar en una compactación inadecuada, resultando en un pobre rendimiento en campo. Por otra parte, una mezcla que es muy trabajable o suave podría resultar en una pobre estabilidad bajo la acción del empuje o deslizamiento inducido por el tráfico. Además el ligante no debe ser demasiado blando ni debe ablandarse excesivamente ante temperaturas más calientes y un contenido de asfalto excesivo presentara problemas de drene.

Idealmente, una vez que la mezcla se coloca en el bache, el asfalto debe curar inmediatamente, dejando una mezcla rígida, eso depende de los tipos de aditivos y componentes presentes en el ligante.

Lo ideal es contar con diferentes tipos de granulometrías para los diferentes tipos y tamaños de baches, no limitarse únicamente a una mezcla con un diseño único, como se mencionó anteriormente y a lo largo del documento, la mezcla puede hacer se comporte como se desee y eso depende de las necesidades el proyecto.

Haciendo una suposición del comportamiento de la mezcla en campo en base a su comportamiento en laboratorio se realizan las siguientes recomendaciones:

Realizar una buena compactación, las mezclas inadecuadamente compactadas son también susceptibles al desplazamiento por los vehículos, porque se requiere una buena compactación para desarrollar la trabazón entre los agregados, factor responsable de la estabilidad de la mezcla de bacheo.

El escurrimiento, que ocurre cuando el asfalto se drene del agregado y se concentra en el fondo de la mezcla, puede ser causado por temperaturas de almacenamiento

inadecuadas, un contenido de asfalto excesivo en la mezcla o la selección de un asfalto que es demasiado blando.

Se propone el añadir pruebas a las establecidas en este estudio, como lo es la prueba de adherencia entre dos pastillas Marshall, expuesta en la investigación de Brian D. Prowell and Alan G. Franklin, *Evaluación of Cold Mixes for Winter Pothole Repair* (1995) o la prueba de cohesión designación AASHTO TP 44-94 para tener más parámetros que garanticen el buen desempeño de la mezcla.

Finalmente se establece la conclusión de que la mezcla de mejor desempeño fue la elaborada con el asfalto aditivado Prototipo 1, el menos blando de los dos, pero proporcionando la trabajabilidad necesaria y esperada en la mezcla; en base al pre diseño 2, un contenido de 2% de asfalto AC-20, y 3% de asfalto aditivado, utilizando la granulometría de bacheo gruesa, con un proporcionamiento de 60% grueso y 40% finos, suficiente para darle una buena cohesión y tentativamente una buena estabilidad. El asfalto no presenta problemas de compatibilidad con el agregado del banco Tonalá, y mantiene sus características durante periodos de almacenamiento de hasta 56 días, cuando se realizó una última prueba de trabajabilidad con valor de 1 kg/cm<sup>2</sup>, misma a la segunda evaluación de la mezcla.

La granulometría densa presenta igualmente buen desempeño con el diseño similar al de la granulometría gruesa de bacheo, por lo que se puede concluir que la finalidad y propósito del asfalto aditivado de proporcionar trabajabilidad y almacenamiento en la mezcla asfáltica es satisfactoria; la otra parte del diseño, el agregado pétreo, queda abierta para nuevas evaluaciones he indagar en el comportamiento de la parte mineral para el diseño de las mezclas en frío para bacheo.

## Referencias.

- (1).Gómez López, José A. (2015) Proyecto de Carreteras. Diplomado Virtual en Proyecto, Construcción y Conservación de Carreteras. México: Instituto Mexicano del Transporte, 30 septiembre-09 octubre.
- (2).Fonseca Rodríguez, Carlos H. (2011) Proyecto Estructural de Pavimentos Asfálticos, México: AMIVTAC.
- (3).McGennis, Robert; Shuler, Scott y Bahia, Hussain, (1994) SUPERPAVE: Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE. Lexington: ASPHALT INSTITUTE.
- (4).Padilla Rodríguez, Alejandro (2004), Tesina: Análisis de resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- (5). Rico Rodríguez, Alfonso et. al. (1998), Publicación Técnica No.104, Pavimentos Flexibles: Problemática, Metodología de Diseño y Tendencias. Instituto Mexicano del Transporte IMT Qro, México.
- (6).Zarate Aquino, Manuel (2003), Diseño de Pavimentos Flexibles. México: Asociación Mexicana del Asfalto, A.C.
- (7).Osuna Ruiz, Rafael Eduardo (2008), Tesis de maestría en Ingeniería: Propuesta para la implementación de un sistema administrativo de pavimentos para la red vial de la ciudad de Mazatlán, Sin. Facultad de Ingeniería U.N.A.M.
- (8). SCT, Dirección general de servicios técnicos (2014), Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras en México, Primera Edición. Secretaría de Comunicaciones y Transportes SCT, Ciudad de México.
- (9). Garnica Anguas, Paul. et. al. (2005), Publicación Técnica No.267, Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte IMT, Qro, México.
- (10). Miranda Rebolledo, Ricardo Javier (2010), Tesis: Deterioros en pavimentos Flexibles y Rígidos. Universidad Austral de Chile.

- (11). Rodríguez Mineros, Carmen E., Rodríguez Molina, José Antonio (2004) Tesis: Evaluación y rehabilitación de pavimentos flexibles por el método de reciclaje. Universidad del Salvador.
- (12). Téllez Gutiérrez, Rodolfo (1991), Publicación Técnica No.21, Catálogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras mexicanas. Instituto Mexicano del Transporte IMT, Qro, México.
- (13). Valenzuela V., Mariana (2003), Tesis El asfalto, en la conservación de pavimentos. Universidad Austral de Chile.
- (14). Jugo B., Augusto (2005), Manual de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos flexibles. Caracas Venezuela.
- (15). The California Department of Transportation (Caltrans) (2007), Flexible Pavement Preservation 2nd Edition: Chapter 5 Patching and edge repair. California.
- (16). Fonseca Duarte, José Rodolfo (2012), Análisis técnico-económico de las actividades de bacheo para la conservación vial en Costa Rica. Instituto tecnológico de Costa Rica.
- (17). Secretaría de comunicaciones y transportes (2008), Norma N-CMT-4-05-003-08 Calidad de mezclas asfálticas para carreteras. México
- (18). Bañón Blazquez, Luis; Bevia García, José Francisco (2000), Manual de carreteras Vol. 2, Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A., Universidad de Alicante, España.
- (19). Abela Munyagi, Anna (2006), Thesis Evaluation of cold asphalt patching mixes, University of Stellenbosch, Sudáfrica.