



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres

INFLUENCIA DEL POLVO RELLENADOR EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS SUPERPAVE

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ingeniería
de Vías Terrestres

Presenta:

Ing. Rubén Serratos Ochoa

Dirigido por:

Dr. J. Jesús Alonso Mota

SINODALES

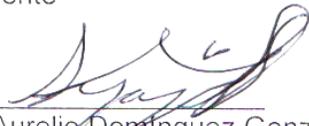
Dr. J. Jesús Alonso Mota
Presidente

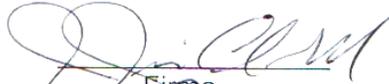
Dr. Pedro Limón Covarrubias
Secretario

Dr. María de la Luz Pérez Rea
Vocal

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Suplente

Dr. Mauricio Centeno Ortiz
Suplente

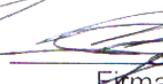

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería

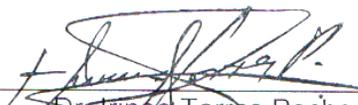

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Inés Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Junio 2014
México

RESUMEN

Con la finalidad de aportar conocimiento y contribuir en la mejora de la infraestructura carretera en nuestro país, la presente investigación se enfoca en la influencia que tiene el polvo rellenedor (Filler como es conocido en el medio) como componente de una mezcla asfáltica elaborada mediante el método: Superior Performing Asphalt Pavement (SUPERPAVE por sus siglas en inglés), para lo cual se evaluó el desempeño de mezclas mediante pruebas que evaluaron sus propiedades mecánicas empleando varias dosificaciones de Filler, además de distinta calidad determinada por el ensaye de azul de metileno. Las pruebas de desempeño que se realizaron a las mezclas que formaron parte del proceso de experimentación durante esta investigación, fueron aquellas que dicta SUPERPAVE hasta un nivel III que corresponde a un diseño de mezcla asfáltica requerida para un tránsito alto.

La investigación inició con la identificación y caracterización del agregado pétreo a emplear en la experimentación. Seguido de la determinación de 3 diseños de mezcla asfáltica modificando la distribución granulométrica del agregado pétreo con lo que al compararlos se encontró que al modificar dicha distribución se logran obtener distintas propiedades volumétricas y se obtienen diferentes relaciones de polvo que se reflejan en la necesidad de adicionar mayor o menor cantidad de cemento asfáltico.

Por último se procedió a evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla mediante las pruebas de desempeño en donde también se pudo observar que la mezcla tiene una mayor densificación al tener un diseño con una relación de polvo adecuada y un Filler de buena calidad, ya que con ello se obtuvieron propiedades mecánicas más favorables de la mezcla.

Palabras clave: Superpave, Filler, susceptibilidad a la deformación, susceptibilidad a la humedad, modulo dinámico.

SUMMARY

In order to provide knowledge and contribute to the improvement of the road infrastructure in our country, the present investigation is focused on the influence of the Filler as a component of an asphalt mixture prepared using the Superpave method, for which assessed the mixtures by performing tests that determined their mechanical behavior using different dosages and quality of Filler, determined by the blue methylene test. Performance tests that were conducted on mixtures that were part of the process of experimentation during this investigation, were those dictated by SUPERPAVE at a level III. These are corresponding to a mixture asphaltic design required by a heavy traffic.

This investigation began with the identification and characterization of stone aggregate to be used in experimentation; followed by the determination of three designs of asphalt mixture, modifying the particle size distribution of the stone aggregate as compared with what was found that by modifying such distribution is possible to obtain different ratios of powder to be reflected in the need to add more or less cement asphalt.

Finally, proceeding to evaluate the mechanical properties of the mixture through performance tests; in which was also observed, that the mixture has a greater confinement to have a design with a ratio suitable powder and Filler good quality, as this more favorable mechanical properties of the mixture were obtained.

Keywords: SUPERPAVE, Filler, susceptibility to deformation, moisture susceptibility, dynamic modulus.

A los alumnos de los posgrados de la
Universidad Autónoma de Querétaro

A mi padre: Rubén Serratos González

A mi hija: Giselle Areli Serratos Torres

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, División de Investigación y Posgrado por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y de esta manera adquirir la preparación, conocimientos y enseñanzas que me fueron transmitidos mediante sus calificados y honorables catedráticos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado la beca ya que fue parte fundamental para complementar los gastos y poder cursar esta maestría.

Al Sindicato de Trabajadores de la Industria Azucarera y Similares de la República Mexicana (S.T.I.A.S.R.M.) que preside el C. Adrián Sánchez Vargas. Gracias por haber confiado en mi capacidad de estudio y haberme otorgado la beca de posgrado que como hijo de obrero y miembro de esta gran familia azucarera, fui beneficiado con este gran derecho el cual me ayudó mucho para solventar los gastos de la maestría.

Al Dr. J. Jesús Alonso Mota:

Mi tutor y director de tesis, gracias por haberme brindado su tiempo, conocimiento y apoyo para encaminarme hasta culminar este proceso de investigación que me ha ayudado a obtener este grado de estudio.

Al Dr. Pedro Limón Covarrubias:

Mi codirector de tesis, que gracias a él y siendo un gran ejemplo a seguir, he podido realizar este trabajo de investigación, pues su apoyo incondicional además de realizar las gestiones para que la empresa SURFAX S.A. de C.V. me brindará la oportunidad de realizar la parte experimental de esta investigación en su laboratorio LASFALTO. Pedro, muchísimas gracias por ayudarme tanto de manera incondicional y por brindarme algo de tu tiempo siempre que lo necesité.

Al Ing. Pedro Mayoral Moreno:

Por haberme inculcado el gusto por los pavimentos y haberme dado su apoyo cuando lo necesité. Por esos conocimientos que me compartió y por ser un ejemplo a seguir.

A mis padres Rubén Serratos González y María de Jesús Ochoa Partida:

Por haber puesto su confianza y apoyo en mí, haciendo un sacrificio para que mis estudios no bastaran con la ingeniería, llegando hasta este grado de estudio y sobre todo por haberme dado una adecuada educación durante toda mi vida además de ser unos padres ejemplares.

A mis sinodales el Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca, Dra. María de la Luz Pérez Rea, Dr. Mauricio Centeno Ortiz, M.I. José Antonio Gómez López, por haberme brindado su tiempo y apoyo los cuales fueron fundamentales para concluir con este trabajo de investigación.

A Fulgencio empleado de Lasfalto que siempre me ha apoyado y brindado sus conocimientos además de darme la mano siempre que necesité algo durante las 2 investigaciones que realicé en ese laboratorio.

A mi amada esposa Diana Marlen Torres Negrete:

Muchas gracias amor por haberme apoyado a realizar esta etapa, una más de preparación en mi vida, por todos esos momentos difíciles en los cuales no pude estar a tu lado y sobre todo por esa confianza tan grande y amor que me has dado que me permitió seguir adelante.

A mi hija Giselle Arellí Serratos Torres:

Te dedico hija este trabajo de investigación por esos momentos en los cuales estando lejos no he podido seguir tu crecimiento y desarrollo como ser humano y sobre todo cuando siendo tan joven, no he podido llevarte de la mano para encaminarte por el buen camino en esta vida. Sé que este documento quedará plasmado por muchos años y espero que algún día puedas leerlo y te sirva como ejemplo para que tú también cuando se llegue tu tiempo seas alguien en la vida. Te quiero mucho hija. Atentamente tu papá.

Al M.I. Irving Casados Mayo por apoyarme e instruirme en las consultas realizadas y sobre todo por ayudarme con el proceso de experimentación de esta investigación.

INDICE

	Página
RESUMEN	i
SUMMARYiii
AGRADECIMIENTOS.....	v
I N D I C E	vii
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS	xii
INDICE DE GRÁFICAS	xiv
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	4
1.2 Descripción del problema	5
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivo general	6
1.5 Objetivos específicos.....	7
II. REVISION DE LITERATURA	8
2.1 DEFINICIONES	8
2.1.1.- Pavimento	8
2.1.1.2.- Tipos de pavimento:	8
2.1.2 Mezcla asfáltica	11
2.1.2.1 Funciones de la mezcla asfáltica como capa de rodadura	12
2.1.2.2 Funciones de la mezcla asfáltica en las capas inferiores del pavimento.....	13
2.1.2.3 Clasificación de las mezclas asfálticas	13
2.1.2.4 Tipología de las mezclas asfálticas	15
2.1.2.5 Selección de una mezcla asfáltica.....	17
2.2 ANTECEDENTES DE DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	20
2.2.1.- Método “The HUbbard-Field “desarrollado alrededor de 1920.....	20
2.2.2.- Método “Marshall” desarrollado en 1930.....	20
2.2.3.- Método “Hveem” desarrollado en 1930.	21

2.2.4. - Método de la “Western Association of State Highway on Transportation Officials” “WASHTO” (1984).....	21
2.2.5. - Método “Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS” (1987).	21
2.2.6.- Método “SUPERPAVE” Superior Performing Asphalt Pavement (1993).....	21
2.2.1.- Selección de los agregados pétreos	24
2.2.2 Selección del cemento asfáltico	28
2.2.3 Selección del nivel de diseño requerido	30
2.2.4 Diseño volumétrico	32
2.2.5.1 Susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad.-Nivel I	33
2.2.5.2 Susceptibilidad a la deformación permanente.- Nivel II.....	33
2.2.5.3 Módulo dinámico - Nivel III	34
2.2.5.4 Fatiga.- Nivel IV	34
2.3 Generalidades del Filler.....	36
III. METODOLOGIA.....	45
3.1 Análisis de los componentes de una mezcla asfáltica.....	45
3.1.1 Asfalto	45
3.1.1.2 Ensayo de punto de reblandecimiento en cementos asfálticos	46
3.1.1.3 Ensayo de recuperación elástica por torsión en cemento asfáltico modificado	47
3.1.1.4 Separación de cemento asfalto modificado	48
3.1.1.5 Ensayo de resiliencia en cementos asfálticos modificados	49
3.1.1.6 Viscosidad rotacional Brookfield de cementos asfálticos	49
3.1.1.7 Pérdida de masa por calentamiento	49
3.1.1.8 Recuperación elástica por ductilómetro.....	50
3.1.1.9 Módulo reológico de corte dinámico, ángulo de fase, temperatura de falla y grado de desempeño	50
3.1.2 Agregado pétreo.....	52
3.1.2.1 Análisis Granulométrico del agregado grueso	55
3.1.2.2 Análisis Granulométrico del agregado fino	56
3.1.2.3 Densidad y absorción del agregado pétreo	58
3.1.2.4 Angularidad del agregado grueso.....	58
3.1.2.5 Angularidad del agregado fino.....	60

3.1.2.6 Partículas alargadas y lajeadas (Forma de la partícula).....	61
3.1.2.8 Durabilidad (Intemperismo acelerado).....	65
3.1.2.10 Materiales deletéreos (Azul de metileno).	69
3.2.1 Parámetros volumétricos.....	72
3.2.2 Diseños volumétricos de experimentación:	73
3.2.2.1 Primer diseño volumétrico:	74
3.2.2.2 Segundo diseño volumétrico:	76
3.2.2.3 Tercer diseño volumétrico	78
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	82
4.1 Pruebas de desempeño en el comportamiento mecánico de la mezcla.....	82
4.1.1 Efecto de las relaciones de Polvo	82
4.1.1.1 Susceptibilidad a la humedad TSR (Tensile Strength Ratio).....	83
4.1.1.2 Susceptibilidad a la deformación permanente (ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo).....	90
4.1.1.3 Módulos Dinámicos	95
4.1.2 Efecto del tipo de Filler	110
4.1.2.1 Susceptibilidad a la humedad (TSR)	111
4.1.2.2 Susceptibilidad a la deformación permanente (ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo).....	116
4.1.2.3 Módulos Dinámicos	122
V. CONCLUSIONES.....	137
VI. LITERATURA CITADA.....	140
VII. ANEXOS	144

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1 Designación del tipo de mezcla en función del tamaño nominal.....	24
2 Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.	25
3 Especificaciones de la caracterización en los agregados pétreos fracción gruesa (Pasa malla $\frac{3}{4}$ " y retenido malla #4).	27
4 Especificaciones de la caracterización en los agregados pétreos fracción fina (pasa malla #4).....	28
5 Rangos de viscosidades para seleccionar las temperaturas de mezclado y compactación entre el agregado pétreo y cemento asfáltico convencional.....	29
6 Nivel de diseño de acuerdo al tipo de tránsito y ensayos correspondientes.....	31
7 La fabricación de los especímenes debe realizarse en el compactador giratorio de acuerdo a la siguiente recomendación.	32
8 Número mínimo de pasadas requeridas para obtener la deformación máxima de 10 mm de acuerdo al grado PG del asfalto.	34
9 Ciclos mínimos a la falla del promedio de tres muestras para la prueba de fatiga a flexión de 4 puntos para la mezcla asfáltica densa.	35
10 Resultados obtenidos de las pruebas realizadas al asfalto.	51
11 Granulometría del material pétreo fracción gruesa.	56
12 Granulometría del material pétreo fracción fina.	57
13 Resultados Densidad y Absorción del agregado pétreo.	58
14 Requerimientos de SUPERPAVE para la angularidad del agregado grueso.	59
15 Resultados de la prueba de angularidad del agregado grueso.....	59
16 Especificaciones de angularidad del agregado fino.	60
17 Resultados de prueba de angularidad del agregado fino.....	61
18 Resultados de ensayo forma de la partícula.	62
19 Resultados del ensayo de desgaste de los ángeles.	64
20 Resultados de ensayo de Intemperismo acelerado.	66
21 Requerimientos de equivalente de arena en función del tránsito.	68
22 Resultados de ensayo de equivalente de arena.....	68
23 Resultado de ensayo de azul de metileno para los 3 distintos Fillers.....	70
24 Resultados de propiedades volumétricas de la mezcla: primer diseño.	74
25 Resultados de propiedades volumétricas de la mezcla: segundo diseño.	77
26 Resultados de propiedades volumétricas de la mezcla: tercer diseño.	79
27 Resultados TSR (Relación de Polvo).	87
28 Resultados del ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo por efecto de las relaciones de Filler.	92

29 Tiempos de acondicionamiento de los especímenes de acuerdo a la temperatura de prueba deseada.	98
30 Rango de esfuerzos en función de la temperatura de prueba.	100
31 Ciclos que deben aplicarse a cada una de las frecuencias de prueba.	100
32 Condiciones de ejecución de la prueba de los 18 especímenes.	100
33 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.....	103
34 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.....	105
35 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.....	107
Resultados TSR (Diseños de mezcla con diferente Filler).	112
37 Resultados de los ensayos de Rueda Cargada de Hamburgo por efecto de la calidad de Filler agregado a la mezcla.	117
38 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.....	123
39 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.	125
40 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.	127
41 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.....	128
42 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.....	131
43 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.....	133

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Estructura de un pavimento flexible.	9
2 Estructura de un pavimento rígido.	11
3 Zonas y respectivos asfaltos a utilizar de acuerdo a su grado de desempeño.....	29
4 Niveles de diseño propuestos por el Protocolo AMAAC.....	30
5 Compactador giratorio propiedad de la empresa SURFAX S.A. de C.V.....	32
6 Equipo de prueba HWT propiedad de la empresa SURFAX S.A. de C. V.	33
7 Equipo empleado en el ensayo de fatiga: servo-hydraulic asphalt testing system (astm-025), GCTS.	35
8 Esquema de interacción Asfalto-Filler (Sandoval, 2009. Estudio del comportamiento reológico del mástico mediante reómetro de corte dinámico, México).....	42
9 Equipo de penétrometro propiedad la empresa SURFAX S.A. de C.V.....	46
10 Momento de ejecución de la prueba al asfalto.....	47
11 Momento de ejecución de la prueba al asfalto.....	48
12 Momento de ejecución de la prueba al asfalto.....	48
13 Localización del banco de material.....	52
14 Agregado pétreo del proyecto fracción gruesa.....	55
15 Agregado pétreo del proyecto fracción fina.....	56
16 Fotografía tomada al agregado grueso.....	59
17 Fotografías de prueba de angularidad del agregado fino.....	60
18 Equipo requerido para la realización del ensayo de partículas alargadas y lajeadas. ..	62
19 Equipo de ensaye de Abrasión propiedad de la empresa SURFAX S.A. de C.V.	63
20 Fotografía tomada de la prueba de desgaste de los ángeles en la cual se puede observar el agregado pétreo dentro del equipo antes de comenzar.....	64
21 Pesaje del sulfato de calcio a emplear en el ensayo de intemperismo acelerado.....	65
22 Fotografía de la solución de agua + sulfato de calcio.....	65
23 Fotografías del material expuesto ante la solución y posteriormente el material lavado y preparado para su siguiente ciclo.....	66
24 Equipo de prueba para la realización del ensayo de equivalente de arena.....	67
25 Fotografía tomada durante la realización del ensaye de equivalente de arena no. 1 ..	67
26 Fotografía tomada durante la realización del ensaye de equivalente de arena no. 2 ..	68
27 Fotografía tomada mediante la realización del ensaye de azul de metileno no. 1.....	69
28 Fotografía tomada mediante la realización del ensaye de azul de metileno no. 2.....	69
29 Fotografía tomada mediante la realización del ensaye de azul de metileno no. 3.....	69
30 Fotografía tomada mediante la realización del ensaye de azul de metileno no. 4.....	70
31 Especímenes de prueba.....	71
32 Especímenes de prueba tipo mezcla disgregada.....	71

33 diagrama de componentes de una mezcla asfáltica compactada.	72
34 Espécimen tipo pastilla recientemente fabricado y extraído del molde del compactador giratorio.	73
35 Especímenes saturados al vacío.....	84
36 Especímenes acondicionados y listos para el ensaye de TSR.....	85
37 Especímenes en baño maría.	85
38 Espécimen y máquina de prueba para TSR.....	86
39 Fotografía tomada durante la ejecución del ensayo de Hamburgo a los especímenes de prueba.	91
40 Espécimen de módulo dinámico al salir del molde del compactador giratorio.	97
41 Espécimen de módulo dinámico al momento de colocarle los sujetadores de los sensores.	98
42 Forma de colocación del espécimen de prueba del ensayo de módulo dinámico con los sensores LDVTs.	99
43 Espécimen colocado y listo para la ejecución de la prueba dentro de la cámara de ambientación.	99
44 Equipo utilizado para la ejecución de la prueba.	101
45 Interfaz del software controlador del equipo necesario para la ejecución de la prueba.	102
46 Fotografía tomada a los especímenes durante la ejecución de la prueba.....	116

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica	Página
1 Granulometría para mezclas con tamaño máximo nominal 19mm.....	26
2 Límites granulométricos Superpave para una mezcla de 12.5 mm (Superpave, 1994)..	38
3 Resultado del análisis granulométrico del agregado en la cual se observa que cumple con los requerimientos de SUPERPAVE,.....	57
4 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto en el primer diseño.....	76
5 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto en el segundo diseño.....	78
6 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto en el tercer diseño.....	80
7 Resultados carga máxima TSR (Relación de Polvo).....	88
8 Tendencia de resultados TSR (Relación de Polvo).....	89
9 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 1,3 Azul= 9.....	93
10 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,9 Azul= 9.....	93
11 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,5 Azul= 9.....	94
12 Isotherma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.....	104
13 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.....	104
14 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.....	106
15 Isotherma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.....	106
16 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.....	108
17 Isotherma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.....	108
18 Comparación de resultados entre curvas maestras referente al efecto de las relaciones de polvo.....	109
19 Resultados TSR (Diseños de mezcla con diferente Filler).....	114
20 Tendencia de resultados al ensaye de TSR correspondiente a los diseños de mezcla a los que se les adiciono Filler de distinta naturaleza mineralógica.....	114
21 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 1,3 Azul= 2.....	118

22 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,9 Azul= 2.	118
23 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,5 Azul= 2.	119
24 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 1,3 Azul= 32.	119
25 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,9 Azul= 32.	120
26 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,5 Azul= 32.	120
27 Tendencia de resultados del ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo por efecto de las relaciones y calidad del Filler.....	121
28 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.	124
29 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.	124
30 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.	126
31 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.	126
32 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.	128
33 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.	128
34 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.....	130
35 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.....	130
36 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.....	132
37 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.....	132
38 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.....	134
39 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.....	134
40 Comparación de resultados entre curvas maestras referente al efecto del tipo de Filler y las relaciones de polvo.....	135

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día las carreteras son un factor muy importante en la economía y desarrollo de un país, ya que esta infraestructura funge como una vía de comunicación directa entre dos puntos los cuales se pretenda unir por las miles de razones que se tenga, además de que se espera que en estas se permita transitar de manera rápida, cómoda y segura.

Los pavimentos flexibles son la solución de pavimentación más económica que existe ya que su diseño y construcción resulta más económico en comparación con los pavimentos rígidos.

A medida que pasa el tiempo y debido a la modernización y evolución de nuestro estilo de vida, las carreteras que fueron diseñadas y construidas en épocas pasadas se han venido deteriorando ya que los nuevos vehículos si han evolucionado pues son más rápidos y tienen capacidades de carga mayores a las que se pensaban años atrás. Debido a esto la condición estructural que nos encontramos en nuestras carreteras es totalmente devastada pues estas no han evolucionado como todo lo demás lo ha hecho, es por eso que han surgido nuevos métodos de diseño de mezclas asfálticas en los cuales se busca que cumplan con las características que se requieren en las carreteras de hoy en día y sobre todo, que se tenga visión a futuro para que no se queden atrás como pasó anteriormente.

Los nuevos métodos de diseño de mezclas asfálticas tienen como objetivo el lograr propiedades volumétricas adecuadas en la mezcla ya que una vez que esta forme parte de una carpeta asfáltica, esto dependerá en gran medida del desempeño de la superficie de rodamiento que tendrá en su vida útil de servicio.

De ahí, la importancia de simular de manera adecuada en el laboratorio, lo que ocurre en campo bajo la acción vehicular y de esta forma llegar a mezclas que muestren un mejor comportamiento en condiciones específicas de tránsito y clima (Garnica, *et. al* 2005).

La práctica de diseño de mezclas asfálticas ha recurrido a diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en laboratorio; los comúnmente más utilizados son el método Marshall y Hveem (Garnica, *et. al* 2005).

Con la finalidad de contribuir en la mejora de las carreteras, la SHRP (por sus siglas en inglés Strategic Highway Research Program) se dedicó a realizar una serie de investigaciones que asegurarán la calidad de los pavimentos de las cuales surgió una nueva metodología de diseño de mezcla asfáltica llamada SUPERPAVE (por sus siglas en inglés Superior Performing Asphalt Pavement) la cual ha tenido una gran aceptación en los Estados Unidos de América tras ponerla en práctica y haber mostrado buenos resultados en cuanto a su desempeño, de ahí que varios países han puesto la confianza en SUPERPAVE en búsqueda de mejorar su infraestructura carretera. Tanto así que en nuestro país la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC) Publicó y puso a disposición una nueva metodología de diseño de mezcla asfáltica a la cual llamó, Protocolo AMAAC que es una adaptación al diseño SUPERPAVE en nuestro país.

Para obtener un pavimento asfáltico de alta calidad es indudable que las propiedades de los materiales, el diseño, la producción y la colocación de la mezcla son factores fundamentales. Una de las ventajas más importantes que brindan las mezclas asfálticas, reside en la gran variedad de espesores en que se puede colocar y en los niveles de rigidez que pueden obtenerse, desde unos 1000 MPa hasta más de 10,000 MPa a temperatura ambiente, lo cual les permite adaptarse casi a cualquier situación estructural y ahora con el uso de los asfaltos modificados también se pueden adaptar con facilidad a cualquier situación climática (Padilla, 2004).

Entre las principales propiedades mecánicas a considerar en el diseño para obtener una mezcla asfáltica de calidad figuran las siguientes:

- a) Estabilidad
- b) Durabilidad
- c) Impermeabilidad
- d) Trabajabilidad
- e) Flexibilidad
- f) Resistencia a la fatiga
- g) Resistencia al deslizamiento

El objetivo principal de este trabajo de investigación, es realizar una serie de pruebas de desempeño a mezclas asfálticas elaboradas mediante el método SUPERPAVE en relación a dosificaciones adecuadas e inadecuadas de Filler como componente de las mismas, además de emplear Filler de distinta calidad determinada mediante el ensayo de azul de metileno.

Con lo anterior se buscó demostrar la eficacia de emplear el Filler como componente de una mezcla asfáltica además de cómo su uso es benéfico para la mezcla, evaluando su desempeño mediante las pruebas que indica la metodología de SUPERPAVE llegando hasta un nivel III de diseño que son:

Nivel 1.- Diseño Volumétrico y ensayo de susceptibilidad a la humedad.

Nivel 2.- Nivel 1 más Ensayo de susceptibilidad a la deformación.

Nivel 3.- Nivel 1 y Nivel 2 más Ensayo de módulo dinámico.

1.1 Justificación

El Filler es un componente que se encuentra en las mezclas asfálticas y es de suma importancia que su dosificación se determine de manera adecuada, ya que una dosificación mayor o menor, influye sistemáticamente en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica. El adicionar Filler a las mezclas asfálticas provoca una modificación que mejora la estructura de la misma, además de que al combinarse con el asfalto se forma una masilla que provee un mayor espesor a la lámina que recubre los agregados pétreos, permitiendo retardar el envejecimiento y cumplir eficientemente con un llenado de vacíos que se traduce en una mayor resistencia a la deformación (Faheem, *et. al* 2009).

Actualmente se deben buscar alternativas que ayuden a mantener en buen estado las carreteras, ya que forman parte fundamental de la economía del país y para ello es necesario conservarlas en óptimo estado para que al transitar en ellas el usuario se sienta seguro y se desplace sobre un camino confortable.

Nuestro país cuenta en su mayoría con carreteras constituidas por pavimentos flexibles que son alrededor de 133,683.20 km los cuales representan el 36.56% del total de los km de carretera existentes (IMT-SCT, Inventario Nacional de Infraestructura del Transporte. INIT 2007/2008). Es por eso que se hace hincapié en la importancia de realizar un estudio a los métodos de diseño de mezclas asfálticas para hacer énfasis en el control de calidad de los materiales que se utilizan y con ello lograr que nuestro país cuente con carreteras en buen estado y a la altura de las carreteras construidas por los países de primer mundo.

En una mezcla asfáltica, el Filler debe dosificarse de manera adecuada, tomando en cuenta las propiedades volumétricas y mecánicas que se pretendan obtener mediante el método de diseño que se utilice, ya sea SUPERPAVE o SMA (por sus siglas en inglés Stone Mastic Asphalt). La importancia de esto radica en obtener buena resistencia a la deformación y un pavimento más duradero.

Darle importancia a realizar un análisis a los criterios establecidos en los métodos de elaboración de mezclas asfálticas nos lleva a obtener pavimentos que cumplan un mayor periodo de servicio, ya que realmente parámetros como lo es adicionar Filler en una mezcla asfáltica no son considerados a fondo por los técnicos al momento de diseñar una mezcla.

1.2 Descripción del problema

Las capas de polvo de origen natural que se encuentran en las superficies del agregado pétreo pueden afectar la adherencia, y el resultado de esto es la unión débil entre el Filler y el agregado pétreo con el asfalto, lo que lleva a la desaparición de las fuerzas de unión que ayudan a mantener el pavimento estable (Leahy *et. al* 1994).

Una mezcla asfáltica actúa como una unidad en un pavimento, esta unidad deberá soportar las condiciones para la cual fue diseñada. Varios estudios demuestran la importancia de adicionar en las mezclas asfálticas el Filler, para lo cual, se ha demostrado su eficacia y beneficio, sólo que los parámetros que se utilizan hoy en día, fueron determinados mediante pruebas en la década de los 90s y a la fecha se han realizado pocas investigaciones acerca de este tema.

El Filler se ha incluido en los nuevos métodos de elaboración de mezclas asfálticas que se usan en los pavimentos, los cuales buscan cumplir con una característica muy importante, que es lograr una eficiencia que lo califique como un pavimento perpetuo. Entre los métodos que incluyen el adicionar Filler a la mezcla y en los cuales se enfoca esta investigación son: Superpave y una adaptación en nuestro país del método SUPERPAVE que es el Protocolo AMAAC.

En la presente investigación, se pretende realizar pruebas de laboratorio que demuestren , la eficacia de emplear el método que indica SUPERPAVE para la obtención de una adecuada dosificación del Filler, o a su vez ajustar el método tomando en cuenta una amplitud mayor en el rango de proporción de polvo contenido en la mezcla además de utilizar Fillers de buena calidad, ya que si no se hace un análisis a fondo para elaborar una mezcla asfáltica en la que se empleé un Filler adecuado puede generar problemas diversos como deformación permanente y fatiga.

1.3 Hipótesis

Al emplear un Filler de buena calidad como componente de las mezclas asfálticas y una relación de polvo adecuada, mejorarán sus propiedades mecánicas como resistencia y durabilidad, lo que se traduce en un mejor comportamiento de la mezcla. Estas mezclas mostrarán óptimos resultados al efectuarles pruebas de desempeño en laboratorio basándose en lo indicado por la metodología de SUPERPAVE.

1.4 Objetivo general

Corroborar los criterios y procedimientos existentes, que definen la cantidad de Filler (relación de polvo contenida en las mezclas asfálticas) que deberá contener una mezcla asfáltica de alto desempeño. Al realizar esta investigación, se despertará el interés por realizar más estudios que nos lleven a la comprobación u obtención de nuevos métodos de dosificación e importancia del uso del Filler en las mezclas asfálticas y en especial las elaboradas mediante el método SUPERPAVE.

1.5 Objetivos específicos

1.- Comprobar si efectivamente los métodos tradicionales de obtención de la dosificación de Filler, pueden seguir siendo empleados o crear nuevas especificaciones para cada uno de ellos.

2.- Evaluar el efecto del Filler en las mezclas asfálticas obtenidas por el método de diseño SUPERPAVE, mediante las pruebas de desempeño.

3.- Utilizar Fillers de distinta calidad determinada mediante el ensaye de azul de metileno para analizar y comparar resultados específicos del comportamiento de la mezcla asfáltica.

4.- Demostrar el comportamiento de la mezcla como resultado de un diseño en el cual se obtenga una relación de polvo por encima del rango, dentro del rango y por debajo del rango que indica SUPERPAVE en su metodología de diseño.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 DEFINICIONES

2.1.1.- Pavimento

Es definido como la estructura compuesta de varias capas de materiales seleccionados que reciben en forma directa las cargas inducidas por el tránsito y que son transmitidas y distribuidas eficientemente hacia las capas inferiores además de proporcionar una superficie que permite el tránsito cómodo, rápido y seguro.

Por su parte Cabanillas (2007) lo define como el conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente.

2.1.1.2.- *Tipos de pavimento:*

Se caracteriza a los pavimentos de acuerdo a los materiales con los que está construida la capa de rodadura de los mismos y como está compuesta la estructura de soporte.

2.1.1.2.1 Pavimento flexible

Este tipo de pavimento se reconoce por estar constituido por una capa de rodadura compuesta de concreto asfáltico y varias capas inferiores como lo son la sub-rasante, la subbase y terracerías, las cuales cada una cumplen la función esencial de disipar los esfuerzos producidos por las cargas que transmite el tránsito. Por su parte Crespo (2002), menciona que los pavimentos flexibles presentan poca resistencia a la flexión y deben de estar constituidos de tal manera que las cargas que se le apliquen no provoquen deformaciones permanentes y perjudiciales.

El pavimento flexible está formado por una carpeta de concreto asfáltico que sirve como superficie de rodadura la cual está apoyada sobre dos capas no rígidas que son la base y subbase, las cuales se encuentran conformadas por materiales que deben de cumplir con especificaciones requeridas.

A continuación se describen las funciones que debe de cumplir un pavimento flexible:

- a).- Resistir y distribuir adecuadamente las cargas producidas por el tránsito.
- b).- Ser impermeable.
- c).- Resistir las cargas de los vehículos.
- d).- Resistir a los agentes atmosféricos.
- e).- Poseer una superficie de rodadura adecuada que permita el tránsito rápido cómodo y seguro.
- f).- Ser flexible para adaptarse a los cambios volumétricos de las capas inferiores.

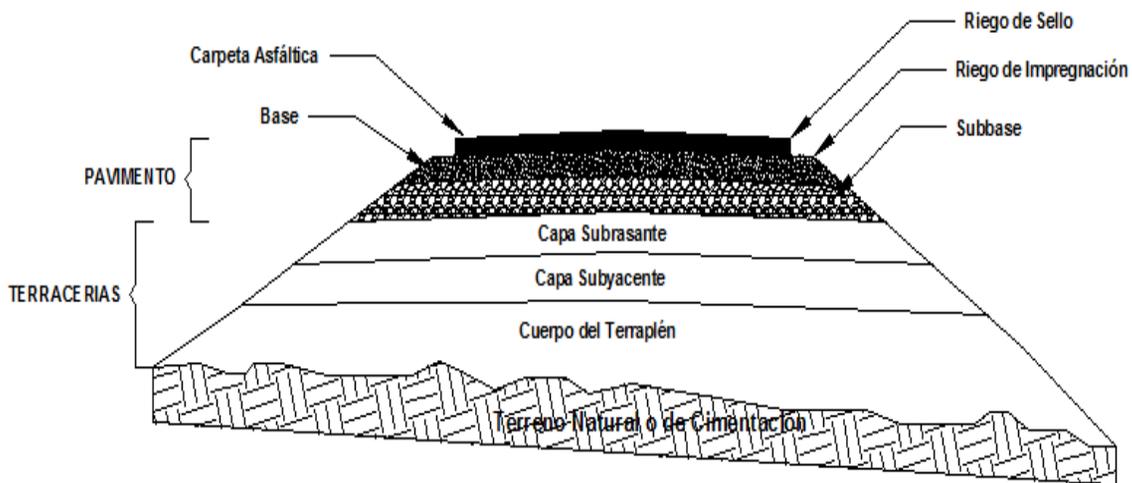


Figura 1 Estructura de un pavimento flexible.

2.1.1.2.2 Pavimento rígido

Un pavimento rígido es aquel que está formado por una capa de rodadura compuesta por losa de concreto hidráulico generalmente hecha de cemento portland. Este tipo de pavimento difiere del anterior debido a que poseen una resistencia considerable a la flexión, además de que se ven influenciados considerablemente por los cambios de temperatura.

Olivera (2004) menciona que un pavimento rígido es aquel que distribuye las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores por medio de toda la superficie de la losa y de las adyacentes, que trabajan en conjunto con la que recibe directamente las cargas. Este tipo de pavimento no puede plegarse a las deformaciones de las capas inferiores sin que se presente una falla estructural. Los pavimentos rígidos están formados por una losa de concreto hidráulico y la subbase que sirve de apoyo y se construye sobre la capa subrasante.

Cabe mencionar que la subbase es considerada la base ya que se posiciona directamente debajo de la losa de concreto hidráulico pero se le designa como subbase debido a que los requerimientos de calidad de los materiales no son tan estrictos como los de una base que conforma un la estructura de un pavimento flexible (Zarate et al, 2002).

Los pavimentos rígidos están sujetos a los siguientes esfuerzos:

- a).- Esfuerzos abrasivos causados por los neumáticos de los vehículos.
- b).- Esfuerzos cortantes causados de la misma manera por los neumáticos de los vehículos.
- c).- Esfuerzos de compresión y tensión que resultan de la deflexión de las losas bajo las cargas inducidas por los vehículos.
- d).- Esfuerzos de compresión y tensión debido a los cambios en la longitud de la losa por acción de la temperatura.

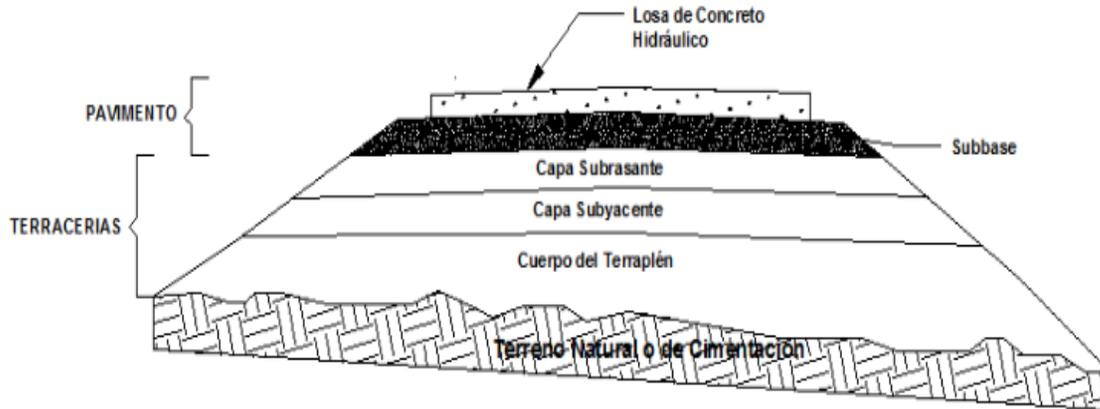


Figura 2 Estructura de un pavimento rígido.

2.1.2 Mezcla asfáltica

Se define como mezcla asfáltica a la combinación entre cemento asfáltico y agregados pétreos de diversa granulometría. Las dosificaciones que se hagan de cada uno de estos componentes influyen directamente en las propiedades físicas que resulten de esta mezcla así como su rendimiento.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (Filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total (Padilla, 2004).

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos de los vehículos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando las condiciones adecuadas de rodadura, cuando se emplean en capas superficiales y como material con resistencia estructural o mecánica en las demás capas del pavimento (Padilla, 2004).

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por estas razones su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y carga.

La funcionalidad primordial en un pavimento se identifica de acuerdo al acabado con el que cuenta su superficie de rodadura y de los materiales con los que está hecha. Es por eso que las mezclas asfálticas al formar parte de ello tienen que cumplir con los siguientes aspectos para que garanticen seguridad a los usuarios:

1. Adherencia del neumático a la superficie de rodadura.
2. Drenar eficazmente el agua de lluvia.
3. Desgaste mínimo hacia los neumáticos de los vehículos.
4. Generar poco ruido en el exterior e interior del vehículo.
5. Proporcionar comodidad y estabilidad a los vehículos.
6. distribuir eficientemente hacia las capas inferiores las cargas producidas por el tránsito.
7. La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
8. Proporcionar la visibilidad óptima para que el usuario se percate de manera oportuna hacia los obstáculos o siga su camino de manera segura.

2.1.2.1 Funciones de la mezcla asfáltica como capa de rodadura

La capa superior de un pavimento es la que debe proporcionar una superficie de rodadura segura y confortable. Debido a sus propiedades físicas, los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos por lo que se hace notable que al transitar por un pavimento flexible es más confortable que en un pavimento rígido.

Otra de las bondades es que la rugosidad requerida es proporcionada por los agregados pétreos que están presentes en la mezcla sin necesidad de aplicar procedimientos especiales para lograr esta rugosidad en la capa de rodadura como es el caso de los pavimentos rígidos. Solamente es necesario mejorar esta condición en casos especiales como lo es en países fríos donde las mezclas contienen gran cantidad de cemento asfáltico.

2.1.2.2 Funciones de la mezcla asfáltica en las capas inferiores del pavimento

El uso de un tipo de mezcla asfáltica como capa de estructura de pavimento ayuda considerablemente a definir un espesor menor en la capa de rodadura debido a que su función estructural ayuda a disminuir eficientemente las cargas que son transmitidas de la capa de rodadura por la acción del tránsito.

2.1.2.3 Clasificación de las mezclas asfálticas

Debido a su diversidad, existen varias maneras de clasificar a las mezclas asfálticas, cada una se clasifica de acuerdo a una característica específica que la defina y a continuación se describen el tipo de clasificaciones de mezcla asfáltica que existen:

a) Por Fracciones de agregado pétreo empleado.

- i. Masilla asfáltica: Polvo mineral (pasa la malla #200) más cemento asfáltico.
- ii. Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- iii. Concreto asfáltico: Agregado grueso más cemento asfáltico.
- iv. Macadam asfáltico: Agregado grueso más cemento asfáltico.

b) Por la Temperatura de tendido.

- i. Mezclas asfálticas en Caliente: Se elaboran con asfalto y agregado pétreo caliente a temperaturas entre los 150°C a 180°C, dependiendo de la viscosidad del cemento asfáltico que se esté utilizando.

- ii. Mezclas asfálticas templadas: Se elaboran con asfalto y agregado pétreo a una temperatura entre 120 y 130°C, dependiendo de la metodología y producto utilizado.
- iii. Mezclas asfálticas en Frío: Este tipo de mezcla recibe este nombre debido a que el tendido en el lugar se hace a temperatura ambiente ya que el ligante de la mezcla es esencialmente emulsión asfáltica realiza a temperatura ambiente.

c) Por la proporción de Vacíos en la mezcla asfáltica.

Esta condición es de suma importancia en las mezclas asfálticas ya que en los últimos años, investigaciones han demostrado que una adecuada cantidad de vacíos influye directamente en un comportamiento adecuado de la mezcla en la que se previenen deformaciones en la misma.

- i. Mezclas Cerradas o Densas: La proporción de vacíos no supera el 6%.
- ii. Mezclas Semicerradas o Semidensas: La proporción de vacíos está entre el 6% y el 10%.
- iii. Mezclas Abiertas: La proporción de vacíos supera el 12%.
- iv. Mezclas Porosas o Drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20%.

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- i. Mezclas de granulometría gruesa: En este tipo de mezcla el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10mm.
- ii. Mezclas de granulometría fina: También conocidas como morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

e) Por la Estructura del agregado pétreo.

- i. Mezclas con Esqueleto mineral: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable.
- ii. Mezclas sin Esqueleto mineral: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla.

f) Por la Granulometría.

- i. Mezclas Continuas: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.
- ii. Mezclas Discontinuas: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en el uso granulométrico.

2.1.2.4 Tipología de las mezclas asfálticas

2.1.2.4.1 Mezcla asfáltica en caliente

Este tipo de mezcla representa en su mayoría a las mezclas asfálticas debido a que los constructores es al que más recurren para la elaboración de sus proyectos. Lo que la define es que en la mezcla se incluyen cemento asfáltico, y agregados pétreos incluyendo aquella fracción del agregado pétreo que pasa la malla #200 y que al ser empleado en la mezcla se le conoce como Filler (polvo rellenedor), estos elementos a excepción del Filler se calientan a altas temperaturas para poder elaborar la mezcla es por eso que se les conoce de esta manera.

En los últimos años a este tipo de mezcla se les ha identificado más porque se ha optado por usar como ligante asfaltos modificados con grado PG debido a los óptimos resultados que se han obtenido al emplearlos.

2.1.2.4.2 Mezclas asfálticas en frío

Este tipo de mezclas se les conoce de esta manera debido a que en el lugar de construcción del pavimento se puede tender la mezcla y compactar a temperatura ambiente sin ningún problema. Esto es debido a que el ligante es en realidad una emulsión asfáltica. Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante.

Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rompimiento lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión. El proceso de aumento paulatino de la resistencia se le suele llamar maduración, que consiste básicamente en la evaporación del agua procedente del rompimiento de la emulsión con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla.

2.1.2.4.3 Mezcla porosa

La característica esencial en este tipo de mezclas es que se emplean básicamente en autopistas donde el tránsito circula a altas velocidades y es necesario que el agua de lluvia se drene rápido y eficazmente. Otra de sus principales características es que se fabrican con asfaltos modificados de grado PG.

2.1.2.4.4 Micro aglomerados

Reciben este nombre debido a que este tipo de mezclas contienen un tamaño máximo de agregado pétreo de 10mm. También son conocidas como lechadas asfálticas y son aplicadas en su mayoría como tratamientos superficiales.

2.1.2.4.5 Masillas

La característica esencial de este tipo de mezcla es que contienen grandes cantidades de Filler y cemento asfáltico y debido a ello, si en su caso contiene pequeñas cantidades de agregado grueso, puede que no sea notorio debido a que se encuentra disperso en la masilla que se forma por el Filler y el cemento asfáltico. Otra característica es que este tipo de mezcla es resistente debido a la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla. Una desventaja es que, es necesario emplear grandes cantidades de cemento asfáltico debido a la superficie específica del Filler que tiene un tamaño máximo de 0.075mm.

2.1.2.4.6 Mezclas de alto módulo

Son mezclas elaboradas en caliente y con asfaltos modificados con características muy rígidas. La cantidad de asfalto que se le adiciona a este tipo de mezclas, se encuentra alrededor del 6% de la masa total de los agregados pétreos contenidos en la mezcla y la cantidad de Filler contenida se encuentra entre el 8% y 10%. En este tipo de mezclas se obtienen módulos elásticos alrededor de 13,000 Mpa y una muy alta resistencia a la fatiga.

2.1.2.5 Selección de una mezcla asfáltica

En la mayoría de los casos el pensar en una mezcla asfáltica como parte del proyecto de pavimentación simplemente se decide en utilizar el tipo de mezcla que se halla empleado en algún proyecto similar o lo que se utiliza de costumbre.

Sin embargo es necesario dejar atrás este tipo de prácticas y considerar todos los factores que estén involucrados en el proyecto como lo pueden ser clima en el lugar, tránsito esperado, agregado pétreo disponible, etc.

Por su parte Padilla (2004) nos dice que para poder elegir adecuadamente un tipo específico de mezcla asfáltica hay que considerar las siguientes fases de las cuales constará el proyecto:

- a) Análisis de las condiciones en las que va a trabajar la mezcla: tráfico, tipo de infraestructura (carretera, vía urbana, aeropuerto, etc.), la capa de la que se trata (rodadura, intermedia o base) y espesor, naturaleza de las capas subyacentes, intensidad del tráfico pesado, clima, etc. También es necesario considerar si se trata de un nuevo proyecto o de una rehabilitación.
- b) Determinación de las propiedades fundamentales que ha de tener la mezcla, dadas las condiciones en las que ha de trabajar. Debe establecerse la resistencia a las deformaciones plásticas o la flexibilidad, entre otras.
- c) Elección del tipo de mezcla que mejor se adapte a los requerimientos planteados, incorporando en este análisis las consideraciones económicas o de puesta en obra que haya que considerar.
- d) Materiales disponibles, elección de los agregados pétreos, los cuales deben cumplir con determinadas especificaciones, pero que en general serán los disponibles en un radio limitado y, por lo tanto, a un costo razonable. Asimismo, hay que elegir el polvo mineral de aportación.
- e) Elección del tipo de ligante: asfalto, asfalto modificado, emulsión asfáltica, el costo es siempre un factor muy relevante.
- f) Dosificación o determinación del contenido óptimo de ligante según un proceso que debe adaptarse al tipo de mezcla, la cual debe hacerse para distintas combinaciones de las fracciones disponibles del agregado pétreo, de manera que las granulometrías conjuntas analizadas estén dentro de un huso previamente seleccionado.

g) Otros factores a tener en cuenta en el diseño y selección de una mezcla asfáltica son los siguientes: Exigencias de seguridad vial, Estructura del pavimento, Técnicas de Diseño y Ejecución. Sitio de construcción del pavimento (topografía, temperatura, terreno, periodo de lluvias, trazado de la vía, entre otros), Condiciones de drenaje y consideraciones económicas.

Para realizar el proyecto de una mezcla asfáltica que se empleará en un determinado pavimento existe una gama amplia de posibles soluciones, para esto se hace necesario un estudio muy riguroso y detenido, para elegir el diseño más adecuado técnica y económicamente.

Existen también principios que se aplican de acuerdo con las siguientes reglas:

a) Tipo de mezclas asfálticas según su composición granulométrica.

El tipo de mezcla asfáltica a emplear se determinará en función de:

- La capa del pavimento a que se destine.
- El nivel de tránsito.

b) Tipo de ligante asfáltico.

El tipo de ligante asfáltico a emplear dependerá de:

- La capa del pavimento al que se destine la mezcla.
- El tipo de mezcla.
- El nivel del tránsito.
- El clima de la zona en que se encontrará la carretera.

c) Relación Filler /Asfalto.

La relación de Fíller y asfalto de la mezcla asfáltica, dependerá de:

- La capa del pavimento al que se destine la mezcla.
- El tipo de mezcla.
- El nivel del tránsito.
- La zona en que se encontrará la carretera.

2.2 ANTECEDENTES DE DISEÑO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

A continuación se describe como los métodos de diseño de mezclas asfálticas han evolucionado de manera benéfica en los últimos años, en su búsqueda de lograr que una mezcla asfáltica se desempeñe de una manera más adecuada y sobre todo que esta cumpla totalmente con los propósitos para lo cual sea diseñada.

2.2.1.- Método “The HUBbard-Field” desarrollado alrededor de 1920.

En este método su enfoque fue evaluar la cantidad de vacíos contenidos en la mezcla asfáltica y en el agregado mineral, siendo de los primeros en tomar en cuenta estas características de diseño. A su vez también tomaba en cuenta su estabilidad y la medición de la deformación, convirtiéndose en un método adecuado para la evaluación de granulometrías finas y diseño de mezclas que utilizaban un agregado pequeño o de granulometría fina. En las mezclas con agregados gruesos no era recomendable emplear este método.

2.2.2.- Método “Marshall” desarrollado en 1930.

Método desarrollado en los años de la segunda guerra mundial por el Ingeniero Bruce Marshall a quien es debido el nombre del método y enfocado para su uso en carreteras.

Su enfoque principal se basa en la fluencia, densidad, estabilidad y cantidad de vacíos contenidos en la mezcla asfáltica. Es el método más empleado en la actualidad y no ha sido modificado desde los años 40 simplemente ha tenido cambios en las especificaciones.

2.2.3.- Método “Hveem” desarrollado en 1930.

Este método fue desarrollado a la par que el método “Marshall”, solo que este evalúa una estabilidad pseudotriaxial. Al igual que el método “Marshall” también evalúa la densidad y estabilidad pero también la resistencia de la mezcla al hinchamiento (expansión) por la presencia de agua. Este método tiene dos ventajas ya que emplea un método de compactación por amasado y el parámetro de resistencia/estabilidad.

2.2.4. - Método de la “Western Association of State Highway on Transportation Officials” “WASHTO” (1984).

Este método de diseño de mezclas asfálticas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la Resistencia a las deformaciones permanentes (roderas).

2.2.5. - Método “Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS” (1987).

Este método surgió con la necesidad de realizar cambios en el diseño de mezclas asfálticas. Este método se enfoca en un nuevo método de compactación en laboratorio y el análisis de las propiedades volumétricas de la mezcla. Así como también, se enfoca en el desarrollo de pruebas para identificar deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.

2.2.6.- Método “SUPERPAVE” Superior Performing Asphalt Pavement (1993).

Este método surgió a partir del método AAMAS. SUPERPAVE, emplea un Nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, funcionando básicamente por la predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio para prevenir grietas por fatiga y grietas a baja temperatura. Este método actualmente es implementado en varios departamentos de transporte (DOT) de Estados Unidos, debido a que su funcionamiento ha arrojado buenos resultados.

Este método promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos. SUPERPAVE representa el sistema más avanzado de especificación de los materiales pétreos, diseño de mezclas asfálticas y su análisis, así como la predicción del desempeño de los pavimentos en las carreteras, incluyendo equipos de ensayo, nuevos métodos y criterios de evaluación (Zapata F. 2000).

2.3 SUPERPAVE

Este método está orientado a mezclas asfálticas de granulometría densa o mejor conocidas como mezclas de alto desempeño, además de que este contiene la metodología necesaria para diseñar una mezcla asfáltica que se utilice en la construcción de pavimentos para carreteras en donde se desee obtener altos niveles de desempeño.

Los inicios del SUPERPAVE figuran aproximadamente en el año de 1987, cuando el Strategic Highway Research Program (SHRP) fue establecido por el congreso de los Estados Unidos de América con un presupuesto alrededor de los 150 millones de dólares para programas de investigación en pavimentos, con el fin de buscar una mejora en el desempeño y duración de los mismos (Garnica, et al 2005).

Parte de este presupuesto fue empleado para desarrollar pruebas e investigaciones basadas en asfalto para con ello desarrollar nuevas especificaciones relacionadas directamente con el análisis de laboratorio y con aplicaciones en campo (Garnica, *et al* 2005).

Tras la serie de investigaciones enfocadas a la caracterización de agregados pétreos y productos asfálticos realizada a cargo de la SHRP, surgió el producto final de las mismas, dando a conocer una nueva metodología de diseño de mezclas asfálticas llamada SUPERPAVE. La cual incluye en su metodología tanto el cómo diseñar mezclas, caracterizar asfaltos, caracterizar agregados pétreos y además el implementar pruebas de desempeño en laboratorio de las mezclas (Garnica, *et al* 2005).

Cabe destacar 2 aspectos claves en la metodología de SUPERPAVE los cuales son:

- 1.- La compactación en laboratorio mediante un compactador giratorio
- 2.- Las pruebas de desempeño

Hablando del primer aspecto clave de SUPERPAVE, nos dice que la compactación en laboratorio se realiza con el Compactador Giratorio SUPERPAVE (SGC). Si bien este equipo su principal función es compactar los especímenes de ensayo comúnmente llamados pastillas y al momento, proporcionar los datos de la altura de compactación mediante giros de diseño, con este dato es posible además calcular la gravedad específica del espécimen.

Cabe destacar que nuestro país ha adaptado esta metodología a la cual le ha añadido diversos ensayos de comportamiento, estos en función de la importancia de la mezcla asfáltica, el nombre que se le ha dado a este método de diseño de mezclas asfálticas es "Protocolo AMAAC".

Una vez descrito brevemente lo que implica este método de elaboración de mezclas asfálticas, a continuación se muestra la metodología a seguir:

2.2.1.- Selección de los agregados pétreos

*Granulometría de la mezcla:

La granulometría a utilizar en una mezcla asfáltica se debe seleccionar de acuerdo a la función requerida para la capa asfáltica en la estructura de un pavimento. Con base en las necesidades del proyecto se podrán fabricar cinco tipos de mezcla asfáltica cuya designación es la que muestra la tabla 1.

Tabla 1 Designación del tipo de mezcla en función del tamaño nominal.

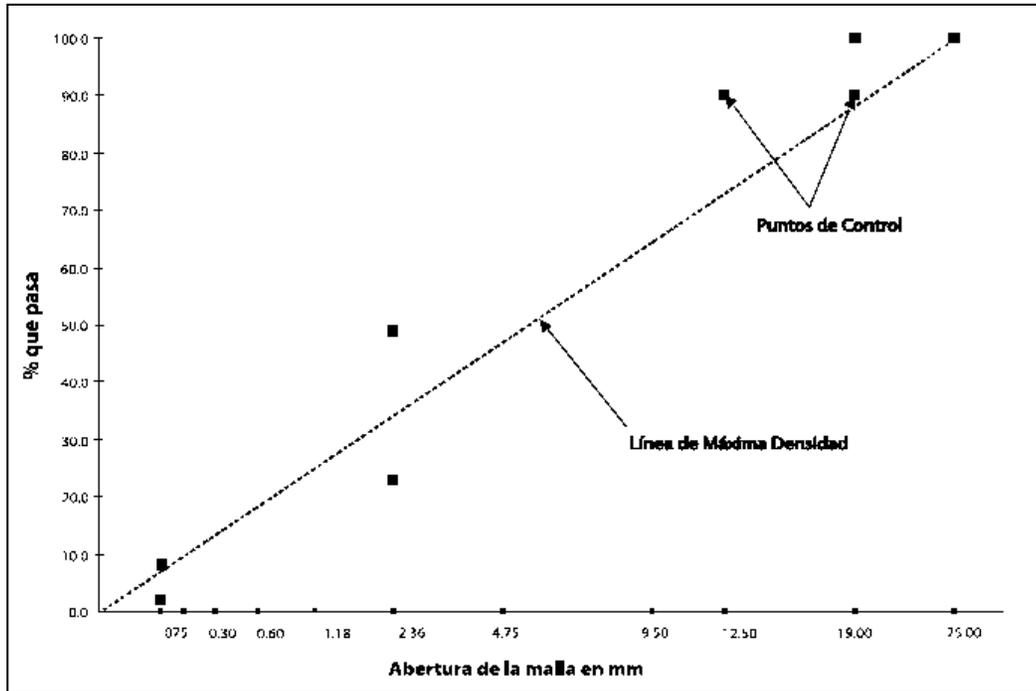
Granulometría por tipo de Mezcla		
Designación de la mezcla Mm	Tamaño Nominal mm	Tamaño Máximo mm
37,5	37,5	50,0
25,0	25,0	37,5
19,0	19,0	25,0
12,5	12,5	19,0
9,5	9,5	12,5

Los requisitos recomendados de granulometría para el caso de una carpeta asfáltica de granulometría densa son los que muestra la Tabla 2.

Tabla 2 Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.

Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg)						
Designación	Abertura (mm)	37,5 (1-1/2")	25 (1")	19 (3/4")	12,5 (1/2")	9,5 (3/8")
		Porcentaje que pasa				
2"	50	100 - 100	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	90 - 100	100 - 100	-	-	-
1"	25	-90	90 - 100	100 - 100	-	-
3/4"	19	-	-90	90 - 100	100 - 100	-
1/2"	12,5	-	-	-90	90 - 100	100 - 100
3/8"	9,5	-	-	-	-90	90 - 100
4	4,75	-	-	-	-	-90
8	2,36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67
16	1,18	-	-	-	-	-
30	0,60	-	-	-	-	-
50	0,30	-	-	-	-	-
100	0,15	-	-	-	-	-
200	0,075	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

A manera de ejemplo, la siguiente gráfica 1 se ilustra los límites establecidos para una mezcla con tamaño nominal de 19 mm. La escala de la abertura de la malla esta elevada a la potencia 0,45. En todos los demás casos se debe construir la gráfica correspondiente.



Gráfica 1 Granulometría para mezclas con tamaño máximo nominal 19mm.

Una mezcla de granulometría densa se puede utilizar para cumplir cualquiera o todas las necesidades de los diseñadores de pavimento siguientes:

- Estructural (Mezclas finas y gruesas de 37,5, 25 y 19 mm). Este es el propósito principal de las mezclas de granulometría densa y es ante todo una función del espesor de la capa. Sin embargo, los materiales seleccionados pueden mejorar el valor estructural de las mezclas.

- Fricción (Mezclas gruesas de 19, 12,5 y 9,5 mm). Esto es una consideración importante para las carpetas de superficie. La fricción es una función de las propiedades del agregado y mezcla.

- Nivelación (Mezclas finas de 12,5 y 9,5 mm). Esta mezcla puede utilizarse en capas delgadas o gruesas para rellenar depresiones de las carreteras.

- Bacheo (Mezclas finas y gruesas de 12,5 y 9,5 mm). La mezcla debe reunir los mismos requerimientos que la utilizada para una nueva.

Las mezclas con función estructural de granulometría fina se recomiendan para caminos de tránsito bajo y/o moderado donde no se colocará ningún tipo de tratamiento superficial o capa de desgaste.

*. *Calidad de los agregados pétreos*

Las características físicas básicas que deben cumplir las fracciones gruesa y fina del agregado pétreo a seleccionar son las que se indican en las Tablas 3 y 4 respectivamente.

Tabla 3 Especificaciones de la caracterización en los agregados pétreos fracción gruesa (Pasa malla ¾" y retenido malla #4).

Característica	Norma	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx. (capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO TP 58-99	18 máx. (capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas alargadas, %	ASTM D 4791	Relación 3 a 1, 15% máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D 4791	Relación 3 a 1, 15% máx.

Tabla 4 Especificaciones de la caracterización en los agregados pétreos fracción fina (pasa malla #4).

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 min. (capas estructurales) 55 min. (capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	AASHTO T 112	15 máx. (capas estructurales) 12 máx. (capas de rodadura)

Se recomienda considerar al menos tres granulometrías diferentes para dosificación y diseño de la mezcla. Las tres granulometrías pueden corresponder a las variaciones esperadas durante la producción en un cierto banco de materiales.

2.2.2 Selección del cemento asfáltico

El cemento asfáltico se debe seleccionar en función de la temperatura máxima y mínima que se esperan en el lugar de aplicación que en nuestro país se hace de acuerdo a la región donde se hará el proyecto y por el cual se necesite un diseño de mezcla asfáltica. La selección del asfalto mediante la región se hace de acuerdo a la norma: a la Norma de la SCT N-CMT-4-05-004/05 Calidad de materiales Asfálticos Grado PG. A continuación en la figura 3 se podrá observar la distribución de las zonas y sus respectivos asfaltos que deberán de utilizarse.

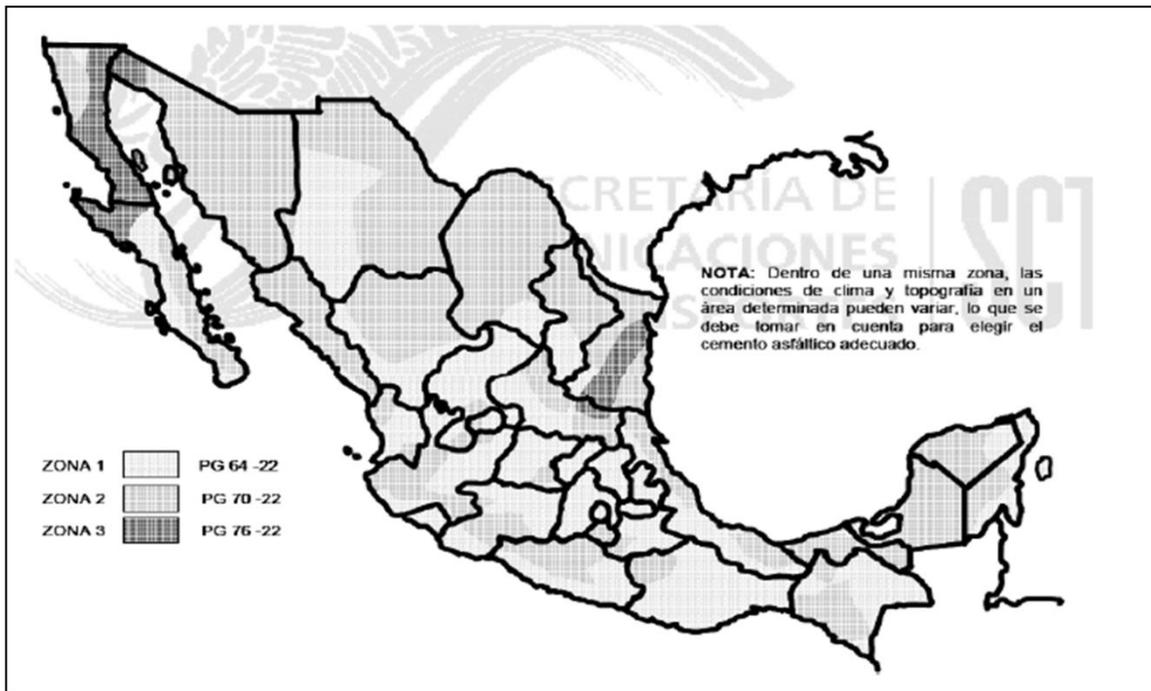


Figura 3 Zonas y respectivos asfaltos a utilizar de acuerdo a su grado de desempeño.

Si el cemento asfáltico seleccionado es convencional, se le determinará su carta de viscosidad usando un Viscosímetro Rotacional de acuerdo a la norma ASTM D-4402. De esta carta se obtendrán las temperaturas de mezclado y compactación adecuadas que corresponderán a los valores de viscosidad que se presentan en la siguiente Tabla 5. Para cementos asfálticos modificados las temperaturas mencionadas deben ser proporcionadas por el proveedor.

Tabla 5 Rangos de viscosidades para seleccionar las temperaturas de mezclado y compactación entre el agregado pétreo y cemento asfáltico convencional.

Característica	Rango de Viscosidad, Pa.s
Temperatura de mezclado	0,15 a 0,19
Temperatura de compactación	0,25 a 0,31

2.2.3 Selección del nivel de diseño requerido

Protocolo AMAAC, establece diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función de la importancia de la carretera, determinada por el nivel de tránsito esperado en el carril de diseño. La siguiente Figura 4 ilustra los diferentes niveles de diseño:

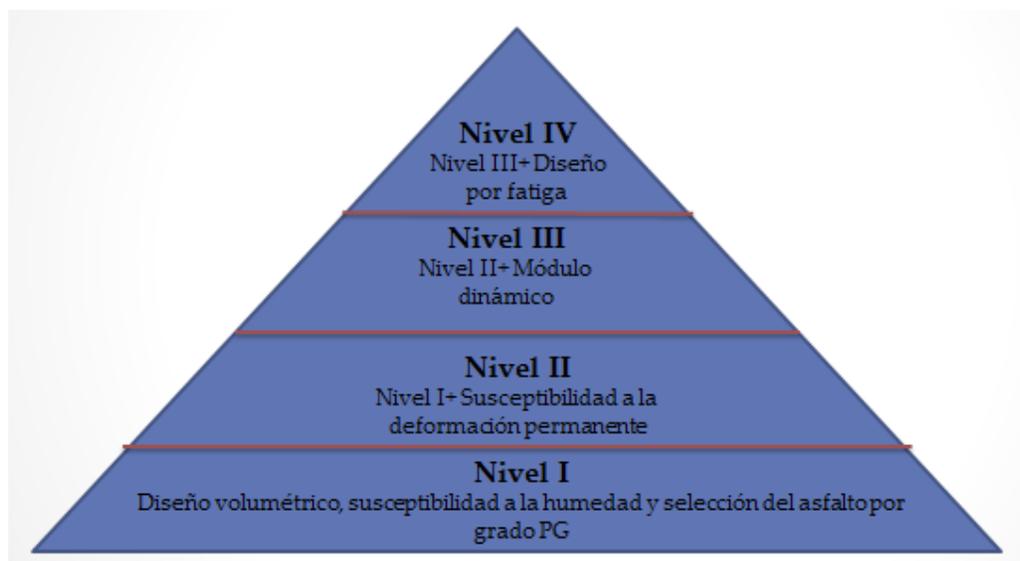


Figura 4 Niveles de diseño propuestos por el Protocolo AMAAC

En la Tabla 6 se presenta la recomendación para la selección del nivel de diseño de las mezclas asfálticas de granulometría densa en función del tránsito vehicular.

Tabla 6 Nivel de diseño de acuerdo al tipo de tránsito y ensayos correspondientes.

Designación del nivel de diseño en función del tránsito	Número de ejes equivalentes	Tipo de carreteras que lo demandan	Pruebas de desempeño requeridas
Bajo tránsito Nivel I	< '1000,000	Carreteras Federales tipo D	Diseño Volumétrico
		Carreteras Alimentadoras	
		Carreteras Estatales y Municipales	Susceptibilidad a la Humedad
		Calles Urbanas	
Tránsito alto Nivel II	1'000,000 a 10'000,000	Carreteras Estatales	Diseño Volumétrico
		Carreteras Federales tipo B y C	Susceptibilidad a la Humedad
		Vialidades Urbanas	Susceptibilidad a la Deformación Permanente
Muy alto tránsito Nivel III	10'000,000 a 30'000,000	Carreteras Federales tipo A	Diseño Volumétrico
			Susceptibilidad a la Humedad
		Autopistas de Cuota	Susceptibilidad a la Deformación Permanente
			Modulo Dinámico

2.2.4 Diseño volumétrico



Figura 5 Compactador giratorio propiedad de la empresa SURFAX S.A. de C.V

En esta sección se establecen los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica que se indican en la Tabla 7. El contenido de asfalto óptimo será el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire (V_a) en la mezcla del 4%. Cumpliéndose además los requerimientos indicados en la misma

Tabla 7 La fabricación de los especímenes debe realizarse en el compactador giratorio de acuerdo a la siguiente recomendación.

Requerimientos para el Diseño Volumétrico de la Mezcla										
Nivel de tránsito y diseño	Densidad requerida (% de la gravedad específica teórica máxima - Gmm)			Vacíos de agregado mineral mínimo en % - VMA					Vacíos llenos de asfalto en % (VFA)	Relación Filler asfalto
	Nivel de compactación giratoria			Tamaño nominal (mm)						
	Nini	Ndis	Nmáx	37,5	25	19	12,5	9,5		
I Bajo	≤ 91,5	96	≤ 98	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	70 - 80	0,6 - 1,2
II Medio	≤ 90,5								65 - 78	
III Alto	≤ 90,5								65 - 78	

Para la determinación de los parámetros volumétricos de la mezcla se deben emplear las fórmulas de la Tabla A-1 que se encuentra en el apartado ANEXOS.

2.2.5 Pruebas de desempeño de la mezcla asfáltica

2.2.5.1 Susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad.-Nivel I

El ensaye se debe realizar aplicando el ensaye de “Resistencia de las Mezclas Asfálticas al Daño Inducido por humedad” (TSR) y para todos los niveles de diseño el valor mínimo aceptable es de $TSR = 80\%.m$

2.2.5.2 Susceptibilidad a la deformación permanente.- Nivel II

Para revisar la susceptibilidad de la mezcla a la deformación permanente se empleó el ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo. El ensaye se debe realizar de acuerdo al ensaye, “Susceptibilidad a la Humedad y a la Deformación Permanente por Rodera de una Mezcla Asfáltica Tendida y Compactada, por medio del Analizador de la Rueda Cargada de Hamburgo (HWT)”.

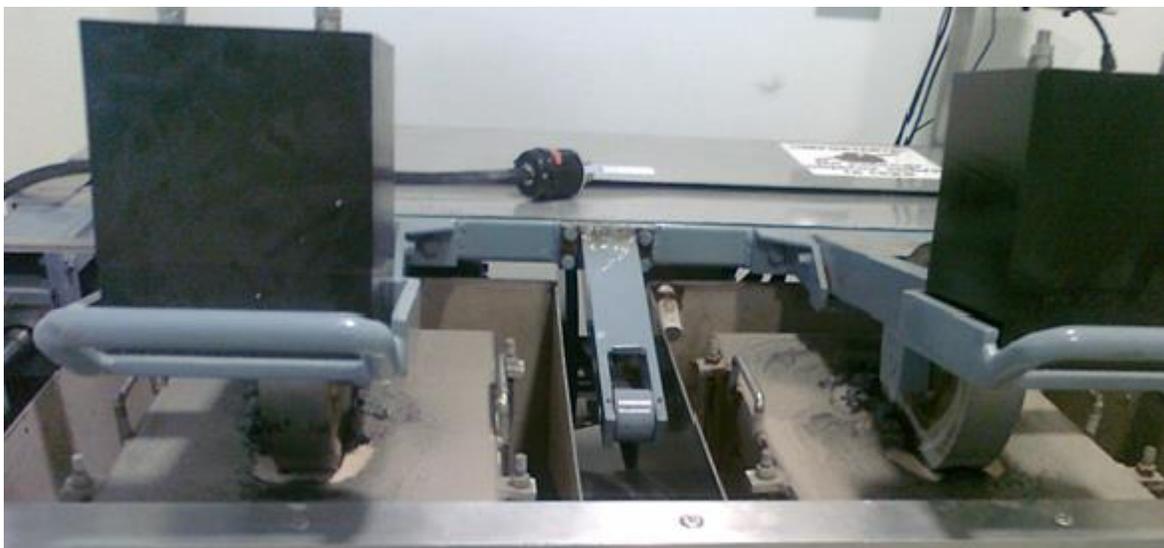


Figura 6 Equipo de prueba HWT propiedad de la empresa SURFAX S.A. de C. V.

Las especificaciones se indican en la Tabla 8, las cuales van en función del grado PG del asfalto que se esté utilizando en la mezcla.

Tabla 8 Número mínimo de pasadas requeridas para obtener la deformación máxima de 10 mm de acuerdo al grado PG del asfalto.

Grado PG superior del asfalto	Mínimo de pasadas para la deformación máxima de 10 mm
Tránsito bajo	10 000
Tránsito alto	15 000
Tránsito muy alto	20 000

2.2.5.3 Módulo dinámico - Nivel III

El módulo dinámico de una mezcla asfáltica es un parámetro esencial para poder calcular los espesores de carpeta asfáltica en los nuevos métodos de diseño de pavimentos asfálticos. Se recomienda determinarlo con el procedimiento ASTM D 3497 o UNE-EN-12697-25, debiendo reportarlo sistemáticamente. No hay especificaciones en este parámetro.

2.2.5.4 Fatiga.- Nivel IV

Actualmente el “Protocolo AMAAC” está incorporando este tipo de ensayos debido a la profundidad del análisis que se hace al comportamiento de la mezcla asfáltica y con la finalidad de innovar en el conocimiento de las mezclas asfálticas elaboradas mediante el método de diseño SUPERPAVE, por lo que se le conoce como nivel IV de diseño aunque en SUPERPAVE aún no se halla agregado. En el nivel IV de diseño se recomienda que una vez determinada la fórmula de trabajo, se deba determinar la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica, empleando la viga de flexión de 4 puntos, conforme al procedimiento especificado en el método AASHTO T-321 bajo las siguientes condiciones:

- Ciclos a la falla
- Frecuencia = 10 Hz,
- Volumen de vacíos de las probetas = $4 \pm 1,0\%$
- Temperatura de prueba = 20 °C
- Método de prueba = AASHTO T-321



Figura 7 Equipo empleado en el ensayo de fatiga: servo-hydraulic asphalt testing system (astm-025), GCTS.

Dependiendo del tipo de asfalto usado, las especificaciones correspondientes se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 Ciclos mínimos a la falla del promedio de tres muestras para la prueba de fatiga a flexión de 4 puntos para la mezcla asfáltica densa.

Tipo de asfalto	Ciclos mínimos a la falla del promedio de tres muestras
Asfalto Convencional AC-20	2000
Asfaltos Modificados o Asfaltos Grado PG PG 70 – 22 PG 70 – 28 PG 76 – 22 PG 82 – 22	5000

2.3 Generalidades del Filler

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la porción de material de un agregado pétreo que pasa la malla # 200(0.075 mm) es llamada polvo mineral, éste regularmente está asociado a la trituración de rocas.

Según Reyes (2011), este polvo mineral forma parte de un sistema de partículas finamente divididas, las cuales pueden encontrarse dispersas en el asfalto, actuando como un medio que puede modificar su consistencia y propiedades mecánicas. A este polvo mineral se le denomina Filler, ya que forma parte de un sistema de unión con el asfalto, se dice que su función principal es actuar como un “llenante o rellenedor” al formar parte de un sistema más grande, compuesto por el asfalto y los agregados pétreos llamado mezcla asfáltica.

Artículos expuestos por el programa estratégico de investigación de carreteras de Estados Unidos (SHRP por sus siglas en inglés), mencionan que de acuerdo a investigaciones realizadas sobre adhesión y absorción entre agregados pétreos y asfalto, los agregados pétreos presentan propiedades electrocinéticas, es decir, varían en función de las especies metálicas activas en la superficie total del agregado pétreo; además, la polaridad de carga cambia dependiendo de la procedencia del mismo y a lo cual el asfalto presenta una buena afinidad o rechazo en la mezcla, creando una afinidad estructural entre los agregados pétreos de mayor tamaño y el asfalto contenido en el polvo, así como también el llenado de vacíos se cumple con mayor efectividad.

La química y la mineralogía en los agregados pétreos desempeñan un papel fundamental en la adherencia con el cemento asfáltico, cada agregado pétreo de un determinado tipo mineralógico tiene una superficie químicamente única, su composición varía considerablemente desde los que son principalmente silíceos a los que son totalmente materiales calcáreos.

De lo anterior se deduce que de acuerdo a la composición mineralógica de los agregados pétreos, la química y el material de menor tamaño contenido en su superficie tiene más influencia para el desarrollo de la estructura que formarán los agregados pétreos y propiedades físicas como durabilidad y rigidez, correspondientes a la mezcla entre asfalto y agregados pétreos (SHRP-A-341 ,1993).

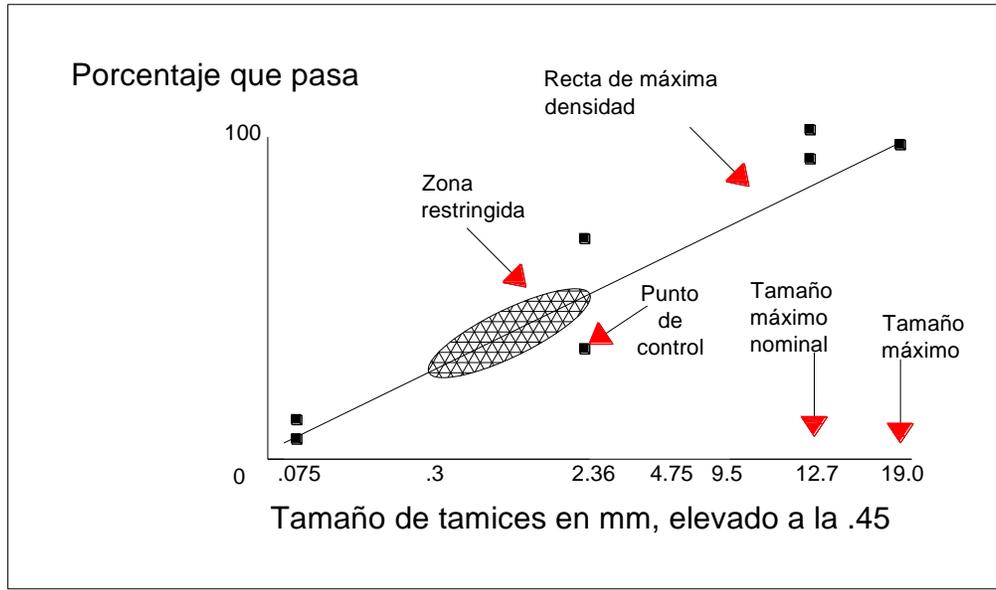
En algunas investigaciones realizadas sobre el método de elaboración de mezclas asfálticas Superpave (D'Angelo, Bukowski, and Harman, 1994) se menciona que el comportamiento de la mezcla asfáltica se explica considerando que el cemento asfáltico y el agregado pétreo actúan como un sistema.

A su vez Coree (1998), menciona que el agregar Filler en una mezcla asfáltica ayuda a reducir los vacíos contenidos en el agregado mineral (VMA), y en caso contrario asegura que si no se adiciona o se llega a reducir la dosificación de Filler en una mezcla, esta puede incrementar su VMA.

En su caso, Leseur (1998), establece que el emplear un limo hidratado haciendo la función de Filler, tiene funciones prometedoras en las mezclas asfálticas al emplearse como aditivo, ya que este ayuda a:

- 1.- Incrementar la resistencia a la humedad
- 2.- Aumentar la resistencia a la deformación permanente
- 3.- Mitigar los efectos del envejecimiento y las fracturas provocadas por el efecto de bajas temperaturas.

Superpave proporciona límites de control comúnmente llamados zona restringida, estos de acuerdo en cuanto a la calidad y tamaños máximos de los agregados pétreos que serán empleados en las mezclas asfálticas, mismas que tendrán que cumplir una característica muy importante: aproximarse a ser un pavimento perpetuo que es lo que se busca para los caminos de hoy en día.



Gráfica 2 Límites granulométricos Superpave para una mezcla de 12.5 mm (Superpave, 1994).

En la Gráfica 2, la zona restringida ubicada dentro del óvalo, es usada por SHRP-Superpave para evitar mezclas con alta proporción de arenas finas en relación al total de arena, y para evitar graduaciones las cuales normalmente carecen de una adecuada cantidad de vacíos del agregado mineral. En muchos casos, la zona restringida nos plantea que el uso de arenas finas naturales en una mezcla de agregados pétreos no es viable. Esto fomentará el uso de arenas limpias procesadas.

La estructura de agregados pétreos diseñada en Superpave, asegura que el agregado pétreo desarrollará un esqueleto granular fuerte, mejorando la resistencia a la deformación permanente a la vez que permite un suficiente volumen de vacíos para garantizar la durabilidad de la mezcla. Las zonas restringidas indican una mezcla con mucha arena fina en relación al total de arena. Esta granulometría prácticamente siempre resulta en un comportamiento débil de la mezcla, la cual provoca una difícil compactación durante la etapa constructiva y una reducida resistencia a la deformación permanente durante la vida útil de la mezcla. (McGennis *et. al*, 1994).

En Superpave, uno de los requerimientos de la mezcla y motivo de esta investigación, es el Filler o llenante. Éste se calcula como el porcentaje en peso del material que pasa el tamiz con abertura de malla de 0.075mm dividido entre el contenido del ligante asfáltico efectivo (expresado como porcentaje en peso de la mezcla).

$$\textit{Proporción de Filler} = \frac{P}{P_{be, estimado}} \quad (1)$$

Dónde:

P: Porcentaje en peso de la cantidad de material que pasa la malla #200

Pbe: Porcentaje de contenido de asfalto efectivo en relación al peso total de la muestra.

Cabe mencionar que todo aquel material que pasa la malla #200 sea de diversa mineralogía, solamente podrá ser llamado Filler si se va emplear en la mezcla asfáltica de otro modo se considera polvo contaminante.

El Filler, es un componente muy importante de las mezclas asfálticas, se calcula en el laboratorio durante el diseño de la mezcla. Un Filler aceptable está en un rango de 0.6 a 1.2, en relación al contenido de asfalto efectivo (SUPERPAVE, 1994).

El Filler que será empleado en esta investigación será polvo procedente de trituración de rocas además de otros dos Filler de distinto origen mineralógico que son: carbonato de calcio y combinación entre fracción de roca que pasa la malla #200 de tepetate y granito.

La calidad de las mezclas asfálticas para pavimentación se puede resumir en tres propiedades principales que son:

*Resistencia a la deformación.

Capacidad para soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos que transitan sobre el pavimento.

$$\text{Esfuerzo en la capa de rodadura} = \frac{P(\text{carga inducida por los vehículos})}{A(\text{área de contacto})} \quad (2)$$

*Flexibilidad.

Habilidad del pavimento a flexionar repetidamente sin romperse. Resistencia a la fisuración por esfuerzos de tensión.

*Durabilidad.

Resistencia a los efectos climáticos y a la acción abrasiva del tráfico, lo que se traduce en un mayor periodo de servicio en años de un pavimento.

El Filler tiene una influencia importante, ya que su inclusión permite:

*Mejorar el cerrado de la mezcla sin el uso excesivo de dosificaciones de asfalto.

Esto debido a que el Filler actúa como rellenedor de vacíos, lo cual permite disminuir espacios libres existentes entre agregados pétreos mayores. Esta condición, además depende de los vacíos de la mezcla, ya que cuando el agregado pétreo está bien graduado permite una mejor distribución de cada uno de los elementos que conforman la mezcla asfáltica.

*Incrementar la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica.

Esto debido a que el Filler aumenta de manera importante la viscosidad del asfalto, mejor dicho la combinación Filler-asfalto que es un sistema de alta viscosidad el cual contribuye de manera importante a incrementar la resistencia ante la deformación.

*Incrementar la durabilidad de la mezcla.

Esto debido a que el Filler actúa como relleno de vacíos, lo cual permite disminuir la porosidad dificultando la entrada de agentes agresivos como agua y aire; además de que es el principal aglomerante dentro de la mezcla asfáltica y mantiene unidos a los agregados pétreos gruesos.

Interacción Filler- Asfalto

Muchos Investigadores han tratado de explicar el mecanismo de interacción Filler-Asfalto mediante diferentes teorías. Uno de los principales y más aceptados es el esquema propuesto por Tunnicliff, teoría que Faheem y Bahía conceptualizaron en el 2009.

Tunnicliff (1953), en un esfuerzo por explicar teóricamente la interacción entre las partículas del Filler y el asfalto, como se puede apreciar en la figura 6, propuso que las partículas de Filler influyen en la matriz de asfalto mediante dos mecanismos. En el primero la partícula absorbe una película de asfalto, requerida para cubrir la partícula. El volumen de asfalto absorbido por este mecanismo puede considerarse como "Volumen de asfalto influenciado". Esto significa que este volumen de asfalto es consumido en cubrir la partícula y que no contribuye a la unión de la mezcla. El segundo mecanismo explica que el Filler influye sobre un volumen adicional de asfalto que no es absorbido.

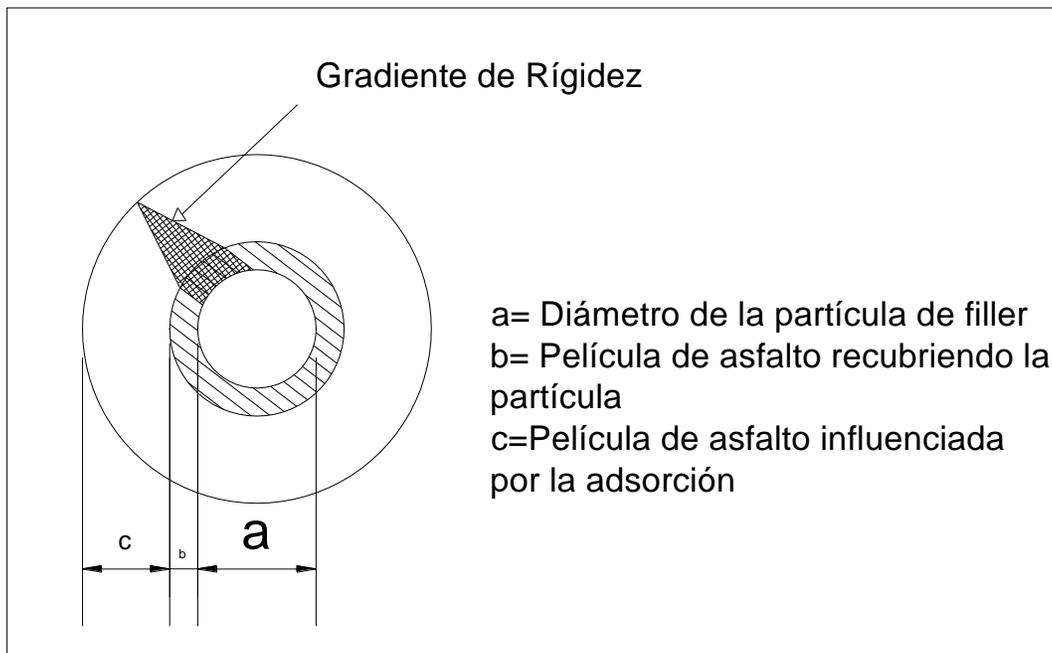


Figura 8 Esquema de interacción Asfalto-Filler (Sandoval, 2009. Estudio del comportamiento reológico del mástico mediante reómetro de corte dinámico, México).

En la figura 8, la influencia del Filler se refleja en aumento de la resistencia de la segunda capa no-adsorbida a través de un gradiente con el aumento de resistencia máximo cercano a la capa adsorbida, y la resistencia decrece gradualmente a través del espesor de esta capa hasta casi desaparecer.

Las fracciones “a”, “b” y “c”, como se muestra en la figura anterior, son consideradas como una unidad incluida en la matriz de asfalto, como una partícula de resistencia efectiva.

Estas unidades flotan en un exceso de asfalto causando este aumento en la resistencia. Este exceso de asfalto es llamado “Asfalto libre”.

En otras palabras, la teoría de Tunnicliff (1953) establece que debido a la interacción asfalto-Filler, existe un volumen efectivo de vacíos rellenos y que de manera general la mezcla obtiene una mejora estructural actuando como una unidad.

Aunque la propuesta de Tunnicliff (1953) es ampliamente aceptada, el volumen de asfalto influenciado por el Filler nunca ha sido medido con éxito en laboratorio porque es muy difícil de medir cuanto en realidad es absorbido por las partículas de Filler y cuanto queda libre para cubrir a los agregados pétreos de mayor tamaño.

Por su parte Bianchetto (2007) realizó una investigación similar pero enfocándose al envejecimiento de las mezclas asfálticas mediante el método UCL y el cómo el adicionar Filler ayuda a mejorar esta propiedad y que con ello, se beneficia indirectamente la propiedad fundamental de las mezclas que es, la capacidad de deformarse sin romperse al absorber esfuerzos relativamente elevados y repetidos. En dicha investigación nos menciona que la medida esencial para definir este comportamiento en las mezclas, es la resistencia al corte, con sus dos componentes: la fricción y la cohesión. Donde el factor friccional se analiza con la implementación de la mecánica de suelos al estudio de las mezclas asfálticas, puesto que los agregados pétreos conforman una estructura granular; en cambio, la cohesión debe evaluarse a partir de las propiedades reológicas del medio continuo presente en la mezcla, el sistema Filler-asfalto, que define su comportamiento ante las sollicitaciones deformantes. Por tales razones, es más apropiado pensar en las cualidades que la mezcla en particular que se forma entre el Filler y el asfalto proporciona a la mezcla en general del Filler-asfalto-agregado pétreo, en lugar de considerar aisladamente al ligante asfáltico.

Por último, Bianchetto (2007) recomienda que en una mezcla asfáltica, la procedencia mineralógica y la cantidad de Filler que se debe adicionar en las mezclas asfálticas debería ser en función de las propiedades volumétricas y físico-mecánicas que se pretendan obtener.

Como se ha podido observar, en investigaciones que han trascendido a lo largo de los años, se ha intentado demostrar tanto la efectividad de adicionar Filler en las mezclas asfálticas como encontrar la cantidad adecuada a emplear.

Sin embargo no se han realizado investigaciones al respecto más recientes y es que se ha dado por entendido que la practica actual del uso y cantidades de Filler a emplear en la mezcla es lo correcto, sin embargo la presente investigación corrobora y demuestra lo contrario, es por ello la importancia de esta investigación y los resultados que se han obtenido y que se presentan a continuación en el siguiente apartado.

III. METODOLOGIA

3.1 Análisis de los componentes de una mezcla asfáltica

En la presente investigación se tomó a consideración realizar la comparativa entre tres tipos de Filler a los cuales se les denominó como Filler adecuado, Filler inadecuado y Filler de procedencia industrial por su distinta procedencia mineralógica y por su resultado al ensaye “Azul de Metileno” propuesto por la metodología SUPERPAVE como parte de las pruebas de caracterización del agregado pétreo.

Sumado a lo anterior se emplearon tres relaciones de Filler que conforme lo indica SUPERPAVE, una está dentro del rango, otra por encima y otra por debajo, indicando que el rango se encuentra en la relación de 0.6 al 1.2. Además en el presente apartado se muestran los resultados a los ensayes para determinar el desempeño del cemento asfáltico empleado en la experimentación de la presente investigación y que forman parte de los requisitos de la metodología SUPERPAVE, mencionando que el tipo de cemento asfáltico que se empleó fue uno de alto grado de desempeño PG 76-22 o mejor conocido como asfalto modificado.

3.1.1 Asfalto

En este apartado se describe lo relacionado a las pruebas de desempeño que evalúan al cemento asfáltico además de mostrar los resultados de las pruebas que se le realizaron para determinar sus propiedades físicas y comprobar que su comportamiento fuera el adecuado para los fines que se requiere.

3.1.1.1 Ensayo de penetración en cementos y residuos asfálticos

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



Figura 9 Equipo de penétrometro propiedad la empresa SURFAX S.A. de C.V.

3.1.1.2 Ensayo de punto de reblandecimiento en cementos asfálticos

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

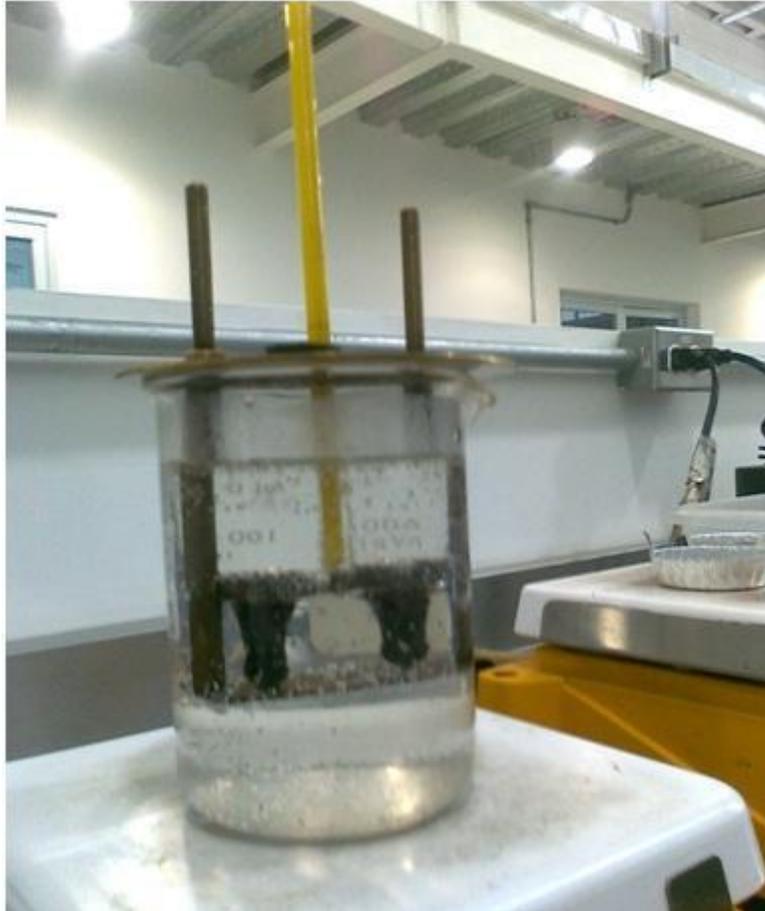


Figura 10 Momento de ejecución de la prueba al asfalto.

3.1.1.3 Ensayo de recuperación elástica por torsión en cemento asfáltico modificado

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



Figura 11 Momento de ejecución de la prueba al asfalto.

3.1.1.4 Separación de cemento asfalto modificado

La prueba consiste en comparar el punto de reblandecimiento (anillo y esfera) en las partes superior e inferior en las muestras tomadas de un tubo con asfalto modificado con polímero y sellado. Ya que con esta prueba se garantiza la correcta incorporación del polímero en el asfalto.



Figura 12 Momento de ejecución de la prueba al asfalto.

3.1.1.5 Ensayo de resiliencia en cementos asfálticos modificados

Al elaborar esta prueba se puede conocer la recuperación elástica por resiliencia en materiales asfálticos modificados sometiendo un espécimen a una prueba de penetración, con el fin de predecir el comportamiento futuro del asfalto.

3.1.1.6 Viscosidad rotacional Brookfield de cementos asfálticos

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, en un rango de 80 a 200°C, mediante la determinación de la resistencia que ofrece una muestra de prueba a la deformación. La prueba consiste en determinar el par de torsión que es necesario aplicar en un eje rotacional, en el seno de una muestra de prueba colocada dentro de un contenedor, bajo condiciones controladas de temperatura, para que gire a una cierta velocidad.

3.1.1.7 Pérdida de masa por calentamiento

Esta prueba permite estimar el endurecimiento que sufren los cementos asfálticos que en películas de pequeño espesor se someten a los efectos del calor y el aire. La prueba consiste en someter una muestra de cemento asfáltico a un proceso de calentamiento para producir un residuo al cual, dependiendo del tipo de cemento asfáltico que se está probando, se le realizan diversas pruebas. En el caso de cementos asfálticos normales, al residuo se le efectúan pruebas para determinar la pérdida de masa que experimenta, su viscosidad dinámica, la penetración que conserva respecto a la del cemento asfáltico original, así como su ductilidad.

Si se trata de cementos asfálticos modificados, al residuo se le efectúan pruebas para determinar la pérdida de masa que experimenta, la penetración del residuo y la penetración que conserva respecto a la del cemento asfáltico modificado original, su ductilidad, recuperación elástica en ductilómetro, incremento en temperatura anillo y esfera (punto de reblandecimiento), módulo reológico de corte dinámico, así como su ángulo fase.

3.1.1.8 Recuperación elástica por ductilómetro

Esta prueba permite determinar la recuperación elástica del residuo de la prueba de película delgada y de los residuos asfálticos obtenidos por destilación de emulsiones. La prueba consiste en mantener una muestra de prueba estirada en un ductilómetro durante un tiempo determinado después del cual se corta por la mitad, se deja reposar y finalmente se observa cuanto se recupera la deformación.

3.1.1.9 Módulo reológico de corte dinámico, ángulo de fase, temperatura de falla y grado de desempeño

Esta prueba permite determinar el módulo reológico de corte dinámico y el ángulo fase, como propiedades visco-elásticas lineales de un cemento asfáltico, sometiendo una muestra a esfuerzos de torsión utilizando un reómetro dinámico de corte. Es aplicable a cementos asfálticos con módulos complejos en el rango de 0.1 a 1000 Kpa, los que se obtienen en forma típica entre 5 y 85°C.

-Penetración: Al residuo de la película delgada se le debe medir de nuevo la penetración que aún conserva basándonos en la norma M-MMP-4-05-006/00 SCT.

-Punto de reblandecimiento: Al residuo de la película delgada se le debe medir de nuevo su punto de reblandecimiento que aún conserva basádonos en la norma M-MMP-4-05-009/00 SCT.

-Viscosidad Brookfield: Al residuo de la película delgada se le debe medir de nuevo la viscosidad Brookfield que aún conserva basádonos en la norma M-MMP-4-05-005/02 SCT

-Penetración retenida: Sirve para determinar el índice de resistencia de un asfalto antes y después de un envejecimiento a corto plazo, que puede sufrir este en el proceso de mezclado y en el transporte de la mezcla

La siguiente tabla 10 muestra el resultado obtenido de las pruebas realizadas al asfalto que se utilizó durante la elaboración de este trabajo:

Tabla 10.- Resultados obtenidos de las pruebas realizadas al asfalto.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS		
TIPO DE PRUEBA	Asfalto Modificado	MÉTODO DE PRUEBA
PENETRACIÓN A 25 °C 100gr 5 seg (1/10 mm)	43	M-MMP-4-05-006/00 SCT
PENETRACIÓN A 4 °C 200gr 60 seg (1/10 mm)	26	M-MMP-4-05-006/00 SCT
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO 5°C/min. (°C)	60	M-MMP-4-05-009/00 SCT
RECUPERACIÓN ELÁSTICA POR TORSIÓN A 25°C (%)	43	M-MMP-4-05-024/02 SCT
RESILENCIA 25°C (%)	26	M-MMP-4-05-023/02 SCT
SEPARACIÓN DE ASFALTO MODIFICADO (°C)	0	M-MMP-4-05-022/02 SCT
VISCOSIDAD BROOKFIELD A 135°C SC4-27 12 rpm (cP)	1550	M-MMP-4-05-005/02 SCT
RESULTADO DE LAS PRUEBAS A LA PELICULA DELGADA (RTFO)		
TIPO DE PRUEBA	Asfalto Modificado	MÉTODO DE PRUEBA
PÉRDIDA DE MASA POR CALENTAMIENTO A 163 °C (%)	1,06	M-MMP-4-05-010/02 SCT
PENETRACIÓN A 25 °C 100gr 5 seg (1/10 mm)	22	M-MMP-4-05-006/00 SCT
PENETRACIÓN A 4 °C 200gr 60 seg (1/10 mm)	15	M-MMP-4-05-006/00 SCT
PUNTO DE REBLANDECIMIENTO 5°C/min. (°C)	70	M-MMP-4-05-009/00 SCT
RECUPERACIÓN ELÁSTICA POR DUCTILOMETRO A 25°C (%)	55	M-MMP-4-05-026/02 SCT
VISCOSIDAD BROOKFIELD A 135°C SC4-27 12 rpm (cP)	3520	M-MMP-4-05-005/02 SCT
PENETRACIÓN RETENIDA A 25°C (%)	50	M-MMP-4-05-010/02 SCT
PENETRACIÓN RETENIDA A 4°C (%)	58	M-MMP-4-05-010/02 SCT
GRADO DE DESEMPEÑO PG	76	M-MMP-4-05-025/02 SCT
TEMPERATURA DE FALLA [G*/senδ=2.2 kPa] (°C)	79,95	M-MMP-4-05-025/02 SCT
MÓDULO REOLÓGICO DE CORTE DINÁMICO A 76°C PG	3,269	M-MMP-4-05-025/02 SCT
ÁNGULO DE FASE (δ) A PG (°)	64,00	M-MMP-4-05-025/02 SCT

3.1.2 Agregado pétreo

En la presente investigación se utilizó un agregado pétreo identificado como basalto, dicho material proviene de la región sur-este del estado de Jalisco, en la zona perteneciente a la delegación de San Juan Españática del municipio de Tuxpan.

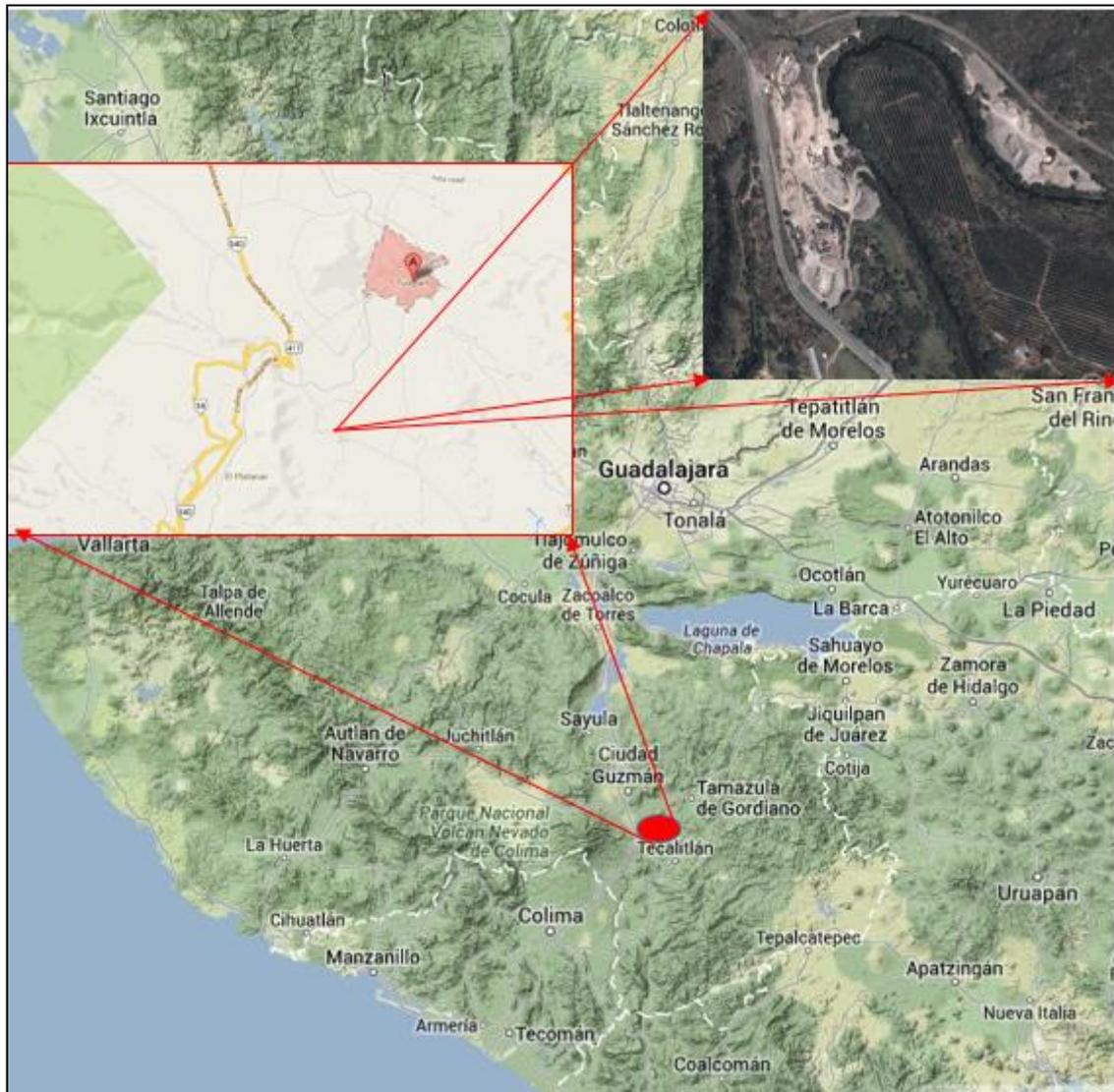


Figura 13 Localización del banco de material

Dentro de las investigaciones que realizó la SHRP para dar origen a SUPERPAVE, se consideró que el agregado pétreo juega un rol clave en el desempeño de la mezcla. Aunque no se desarrollaron procedimientos nuevos para caracterizar a los agregados pétreos, si se refinaron y se adaptaron a SUPERPAVE, estos consistieron en definir nuevas especificaciones para el control de calidad de los agregados pétreos. Una vez adaptados los procedimientos para caracterizar al material pétreo y evaluar sus propiedades, en SUPERPAVE se especifican dos tipos de propiedades de los agregados a las que llamaron: Propiedades de consenso y Propiedades de la fuente de origen.

Las propiedades de consenso son aquellas consideradas por los investigadores de la SHRP críticas para alcanzar un elevado desempeño de la mezcla. Estas propiedades deben satisfacerse en varias escalas, dependiendo del nivel de tránsito y de la posición en el diseño estructural del pavimento. Altos niveles de tránsito y mezclas para la carpeta de rodadura requieren valores más estrictos para las propiedades de consenso y que son:

***Angularidad del agregado grueso**

Su fin, es asegurar un alto grado de fricción interna del agregado y con ello se genera la resistencia necesaria para prevenir ahuellamientos.

***Angularidad del agregado fino**

Tiene el mismo fin de la Angularidad del agregado grueso y se define como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados menores de 2,36 mm levemente compactados. Contenidos de vacíos mayores significan más caras fracturadas del agregado.

*Partículas alargadas y lajeadas

Esta prueba solo se aplica a agregados gruesos mayores a 4,75 mm, para lo cual es muy importante realizarla ya que las partículas alargadas tienden a romperse al momento de compactarse la mezcla y ya terminado el proyecto también son afectadas por el tránsito. Al realizar la prueba se trata de prevenir fallas en el pavimento que dan a lugar deformaciones permanentes y grietas por fatiga.

*Equivalente de arena

La prueba se aplica en los agregados pétreos de menor tamaño a 4,75mm y se utiliza para determinar el contenido de arcilla presente en la fracción del porcentaje del agregado pétreo. Con los resultados de la prueba se puede determinar el aseguramiento de la afinidad que existirá entre el agregado-asfalto a consecuencia del contacto directo entre ambos.

Las propiedades de la fuente de origen del agregado, son aquellas utilizadas frecuentemente por las agencias para calificar las fuentes locales de agregados. Los investigadores de la SHRP creyeron que el cumplimiento de estas propiedades era importante, pero no especificaron valores críticos ya que ellas son muy específicas de la fuente de origen. Las propiedades de la fuente de origen del agregado pétreo son:

*Tenacidad

Abrasión o prueba de Desgaste de los Ángeles. Esta prueba simula la abrasión y degradación mecánica que tendrá que resistir el agregado grueso durante la manipulación, construcción y servicio del mismo dentro de una mezcla asfáltica. Esta prueba se realiza a los agregados gruesos de mayor tamaño a 2,36mm. La importancia de esta prueba radica en la prevención de fallas aparentes como baches y desgranamiento del pavimento.

*Durabilidad. Intemperismo Acelerado. Esta prueba simula y estima la resistencia del agregado pétreo al deterioro expuesto por la acción de los agentes climáticos durante la vida útil del pavimento.

*Materiales deletéreos. Azul de Metileno. Esta prueba determina el porcentaje en peso de los contaminantes presentes en el agregado pétreo tales como arcilla, limos, madera y carbón.

3.1.2.1 Análisis Granulométrico del agregado grueso

Una vez identificado el agregado pétreo se procede a determinar sus fracciones granulométricas. Los resultados que se obtienen en este proceso son empleados para corroborar que el material cumple con la distribución de las partículas que será necesaria para la elaboración de la mezcla asfáltica.



Figura 14 Agregado pétreo del proyecto fracción gruesa

El análisis granulométrico del agregado pétreo se realizó acorde con la norma SCT: N.CMT.4.04/08. La granulometría de este material se hizo en seco y los resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11 Granulometría del material pétreo fracción gruesa.

GRANULOMETRIA AGREGADO GRUESO		
Malla	% Reten.	%Pasa
1"	0	100
3/4"	1,69	98,31
1/2"	25,3	73,01
3/8"	38,41	34,6
No. 4	34,6	0

3.1.2.2 Análisis Granulométrico del agregado fino

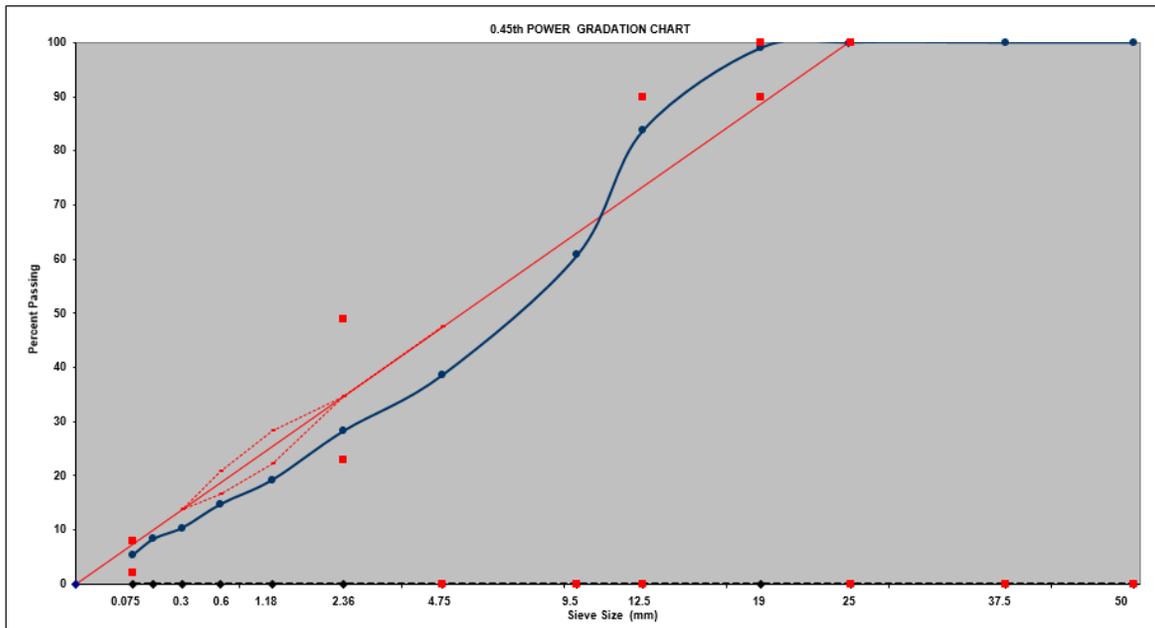
El análisis granulométrico del agregado pétreo se realizó acorde con la norma SCT: N.CMT.4.04/08. La granulometría de este material se hizo por lavado y los resultados se muestran en la Tabla 12.



Figura 15 Agregado pétreo del proyecto fracción fina.

Tabla 12.-Granulometría del material pétreo fracción fina.

GRANULOMETRIA AGREGADO FINO		
Malla	% Reten.	%Pasa
No. 4	3,37	96,63
No. 8	25,9	70,73
No. 16	22,7	48,03
No. 30	11,16	36,87
No. 50	11,03	25,84
No. 100	5,04	20,8
No. 200	7,36	13,44
Pasa 200	13,44	0



Gráfica 3 Resultado del análisis granulométrico del agregado en la cual se observa que cumple con los requerimientos de SUPERPAVE,

3.1.2.3 Densidad y absorción del agregado pétreo

La determinación de estas características del material pétreo se hicieron bajo la norma SCT: M.MMP.4.04.003 Y M.MMP.4.04.012 tanto a la fracción gruesa como fina del agregado pétreo y los resultados se muestran en la Tabla 13.

$$Densidad\ del\ material = \frac{WS}{WSSS - (WSUM - WVAsS)} \quad (3)$$

Dónde:

-WS= Peso del material Seco.

-WSSS= Peso Saturado Superficialmente Seco.

-WSUM= Peso del material Sumergido.

-WVAsS= Peso de la Vasija Sumergida.

$$Absorcion\ del\ material = \frac{WSSS - WS}{WS} \times 100 \quad (4)$$

Tabla 13 Resultados Densidad y Absorción del agregado pétreo.

DENSIDAD Y ABSORCIÓN	
GRAVA Fracción gruesa	ARENA Fracción fina
D=2,57 T/m3	D=2,53 T/m3
Abs= 1,83%	Abs= 2,64%

3.1.2.4 Angularidad del agregado grueso

Con esta propiedad se asegura un alto grado de fricción interna del agregado y resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje en peso del agregado mayor de 4,75 mm con una o más caras fracturadas y las especificaciones de SUPERPAVE se muestran en la Tabla 14. que además presenta los valores mínimos requeridos para la angularidad del agregado grueso en una función del nivel del tránsito y la posición del pavimento (acorde con la norma: AASHTO T304).

Tabla 14 Requerimientos de SUPERPAVE para la angularidad del agregado grueso.

Tránsito, en 10 ⁴ ESALs	Profundidad desde la sup., <100mm	Prof. Desde la sup.,>100mm
<0.3	55/-	0/-
<1	65/-	0/-
<3	75/-	50/-
<10	85/80	60/-
<30	95/90	80/75
<100	100/100	95/90
>=100	100/100	100/100

"85/80". 85% del agregado grueso tiene una cara fracturada y 80% tiene dos caras fracturadas

Los resultados de esta prueba se muestran a continuación:

Tabla 15 Resultados de la prueba de angularidad del agregado grueso.

Especificación: 100% mín.	
"GRAVA"	100%



Figura 16 Fotografía tomada al agregado grueso.

3.1.2.5 Angularidad del agregado fino

Esta propiedad asegura un alto grado de la fricción interna del agregado fino y de la resistencia al ahuellamiento. Se define como el porcentaje de vacíos presente en los agregados, menores de 2,36 mm levemente compactados. Contenidos de vacíos mayores significan más caras fracturadas, las especificaciones para esta prueba se muestran en la tabla 16.



Figura 17 Fotografías de prueba de angularidad del agregado fino.

Tabla 16 Especificaciones de angularidad del agregado fino.

Tránsito, en 10^6 ESALs	Profundidad desde la sup., <100mm	Prof. Desde la sup., >100mm
<0.3	-	-
<1	40	-
<3	40	40
<10	45	40
<30	45	40
<100	45	45
≥ 100	45	45

Resultados del procedimiento de ensayo AASHTO Tp 33:

$$\text{Angularidad del agregado fino} = \frac{V - \frac{W}{G_{sb}}}{V} \times 100\% \quad (5)$$

Donde:

V= volumen conocido del cilindro

W= peso del agregado fino que llena el cilindro de volumen conocido

Gsb= densidad del agregado fino

Tabla 17 Resultados de prueba de angularidad del agregado fino.

ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO			
Lectura	Peso	unidad	Especificación
1	151,4	gr.	
2	148,3	gr.	
3	149,1	gr.	
4	148,6	gr.	
5	148,2	gr.	
Promedio:	149,12	gr.	
Angularidad (U):	41,05%	<i>pasa</i>	40% mín.

3.1.2.6 Partículas alargadas y lajeadas (Forma de la partícula).

El concepto de esta prueba es el porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máxima y mínima es mayor que 5. Las partículas alargadas son indeseables porque tienden a quebrarse durante la construcción y bajo tránsito. El procedimiento de prueba se realiza acorde con la norma ASTM D 4791-99 y de acuerdo a ello los resultados obtenidos se muestran en la siguiente Tabla 18.

Tabla 18 Resultados de ensayo forma de la partícula.

FORMA DE LA PARTICULA		
Ensayo	Resultado	Especificación
Partículas alargadas (%) Relación 3:1	9,84	15% máx.
Partículas lajeadas (%) Relación 3:1	1,81	15% máx.

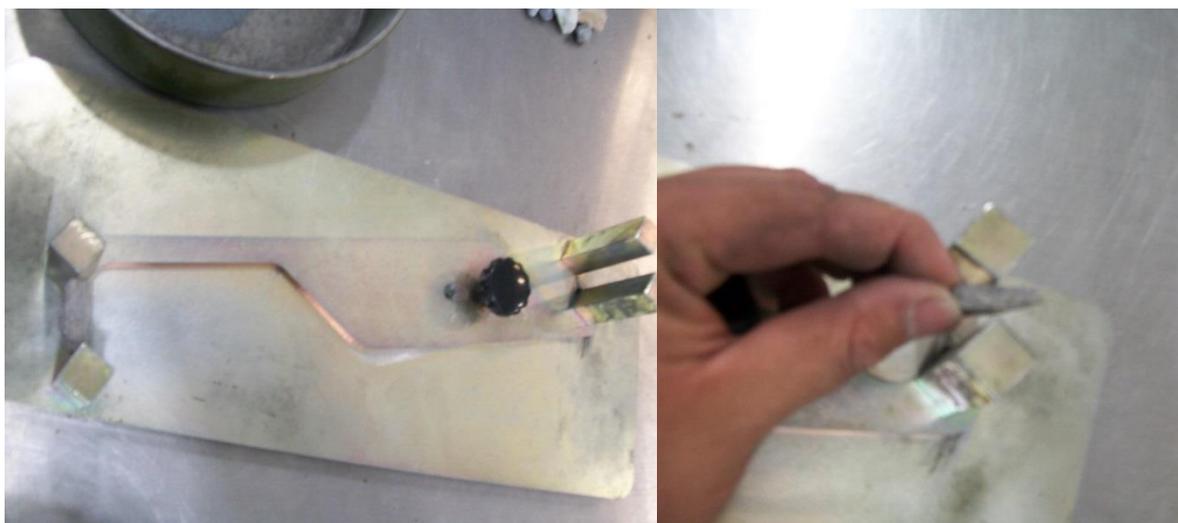


Figura 18 Equipo requerido para la realización del ensayo de partículas alargadas y lajeadas.

3.1.2.7 Tenacidad (Abrasión o Prueba de Desgaste de los Ángeles).



Figura 19 Equipo de ensaye de Abrasión propiedad de la empresa SURFAX S.A. de C.V.

El objetivo de la prueba es determinar la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas.

La prueba consiste en colocar una muestra del material con características granulométricas específicas dentro de un cilindro giratorio, en donde es sometida al impacto de esferas metálicas durante un tiempo determinado, midiendo la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la malla #12 (1,7mm de abertura), antes y después de haber sido sometida a este tratamiento.

La realización de este ensayo se hizo acorde con la norma AASHTO T 96 donde nos indica que los valores típicos de pérdida máximos están aproximadamente entre 35 y 45% solo que SUPERPAVE Indica que para capas estructurales se permitirá un máximo desgaste de 35% y para capa de rodadura solamente permite un desgaste máximo de 30%.



Figura 20 Fotografía tomada de la prueba de desgaste de los ángeles en la cual se puede observar el agregado pétreo dentro del equipo antes de comenzar.

Los resultados de esta prueba se muestran en la siguiente Tabla: 19.

Tabla 19 Resultados del ensayo de desgaste de los ángeles.

ABRASIÓN		
Ensayo	Resultado	Especificación
Desgaste de Los Ángeles, (%)	29	30% máx.

3.1.2.8 Durabilidad (Intemperismo acelerado).

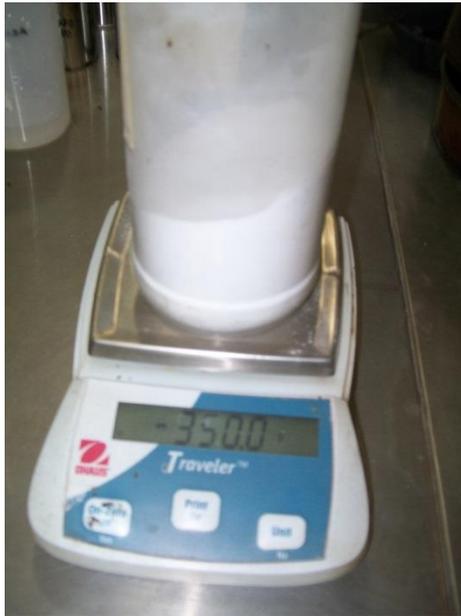


Figura 21 Pesaje del sulfato de calcio a emplear en el ensayo de intemperismo acelerado.

El objetivo de la prueba es determinar la degradación esperada por Intemperismo de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en someter a varios ciclos de saturación y secado los diferentes tamaños de la fracción de agregados gruesos (gravas) de una muestra de materiales pétreos, mediante el empleo de una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio y medir la diferencia de su masa antes y después de haber sido sometido a este tratamiento.

El ensayo se hace conforme lo indica la norma AASHTO T 104 donde nos indica que deberán tomarse 300 gramos de aquel agregado pétreo que pase la malla 3/8" y se retenga en la malla #4. Posteriormente aplicarle al material pétreo 1 litro de agua con 350 gramos de sulfato de sodio diluido y después de 24 horas expuesto el material ante esta solución lavar y repetir el proceso hasta completar 5 ciclos y el resultado del ensaye es el porcentaje total de pérdida sobre varios tamices.



Figura 22 Fotografía de la solución de agua + sulfato de calcio.



Figura 23 Fotografías del material expuesto ante la solución y posteriormente el material lavado y preparado para su siguiente ciclo.

Los valores máximos de pérdida son aproximadamente de 10 a 20% para 5 ciclos como lo establece la norma y los resultados se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20 Resultados de ensayo de Intemperismo acelerado.

DURABILIDAD		
Ensayo	Resultado	Especificación
Intemperismo acelerado, (%)	1,33	15% máx.

3.1.2.9 Contenido de arcilla (Equivalente de Arena).



Figura 24 Equipo de prueba para la realización del ensayo de equivalente de arena.

El procedimiento de prueba lo dicta la norma AASHTO T 176 en la cual nos indica que esta permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en agitar un cilindro, que contiene una muestra del material pétreo que pasa por la malla #4, mezclada con una solución floculante que permite separar la arena de la arcilla.

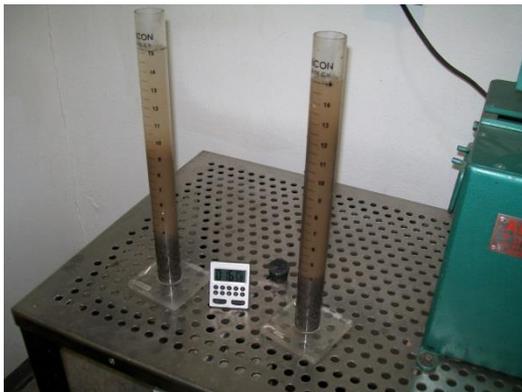


Figura 25 Fotografía tomada durante la realización del ensayo de equivalente de arena no. 1.

La solución floculante fuerza al material arcilloso a quedar en suspensión por encima del agregado granular. Después de un periodo que permite la sedimentación, se mide la altura de arcilla suspendida y la altura de arena sedimentada.



Figura 26 Fotografía tomada durante la realización del ensaye de equivalente de arena no. 2.

El valor del equivalente de arena se calcula como el cociente entre la lectura de la altura de la arena y la lectura de la altura de la arcilla, expresada en porcentaje. En la Tabla 21, se muestran los valores requeridos de contenido de arcilla para agregados finos.

Tabla 21 Requerimientos de equivalente de arena en función del tránsito.

Tránsito, en 10 ⁶ ESALs	Equivalente de arena, mínimo
<0,3	40
<1	40
<3	40
<10	45
<30	45
<100	50
>=100	50

Los resultados obtenidos del material para este ensaye se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22 Resultados de ensaye de equivalente de arena.

CONTENIDO DE ARCILLA		
Ensayo	Resultado	Especificación
Equivalente de arena (%)	70	50% mín.

3.1.2.10 Materiales deletéreos (Azul de metileno).



Figura 27 Fotografía tomada mediante la realización del ensaye de azul de metileno no. 1



Figura 28 Fotografía tomada mediante la realización del ensaye de azul de metileno no. 2

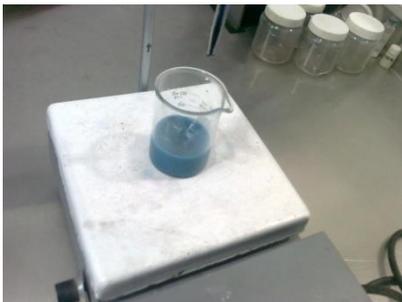


Figura 29 Fotografía tomada mediante la realización del ensaye de azul de metileno no. 3

Esta prueba sigue la metodología que establece la norma AASHTO T 112 la cual permite estimar el grado de reactividad de los materiales finos, con partículas menores de 0,075mm (malla #200), contenidos en los materiales pétreos para mezclas asfálticas.

La prueba consiste en añadir a los finos, dosificaciones controladas de azul de metileno, hasta que ya no lo absorban más. Mientras más azul de metileno retenga los finos, serán más activos, lo cual proporciona un índice indirecto de su potencialidad expansiva.

Recordando lo anteriormente mencionado, en la presente investigación se emplearon 3 Fillers de distinta procedencia mineralógica, para lo cual los resultados de este ensaye aplicado a cada uno de ellos se muestran en la Tabla 23.

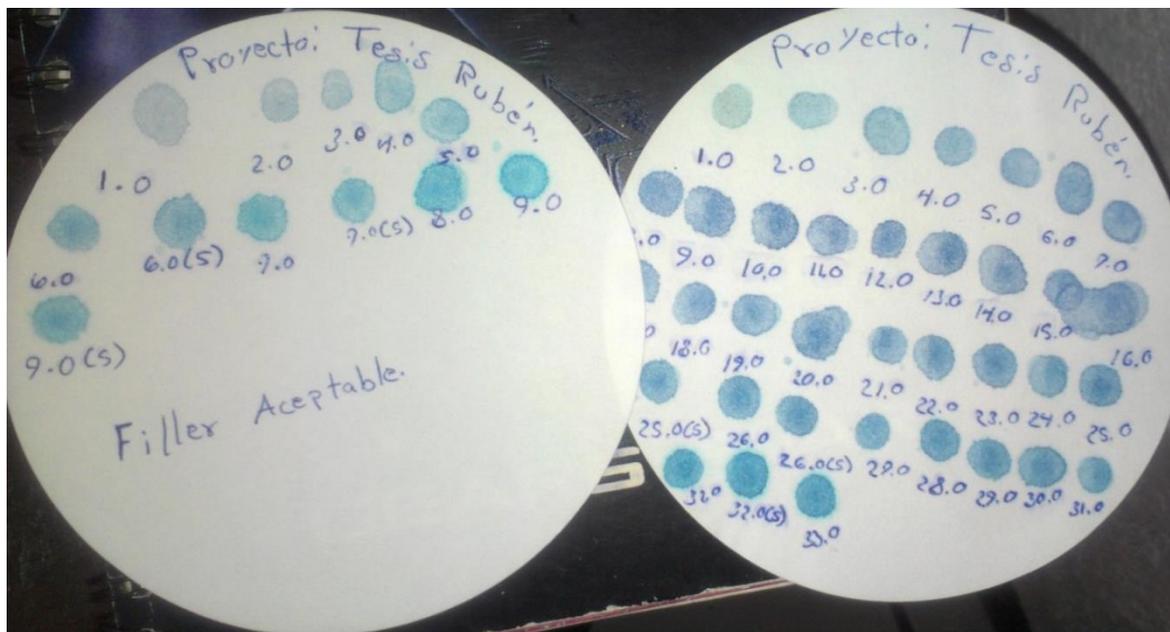


Figura 30 Fotografía tomada mediante la realización del ensayo de azul de metileno no. 4

Tabla 23 Resultado de ensayo de azul de metileno para los 3 distintos Fillers.

MATERIALES DELETREOS		
Ensayo	Resultado	Especificación
Azul de metileno (mg/g) Filler de alta calidad	2	12 máx.
Azul de metileno (mg/g) Filler de mediana calidad	9	12 máx.
Azul de metileno (mg/g) Filler de baja calidad	32	12 máx.

3.2 Diseño volumétrico de una mezcla asfáltica de acuerdo al SUPERPAVE



Figura 31 Especímenes de prueba.

De acuerdo con la metodología de SUPERPAVE, nos indica que la mezcla asfáltica deberá de cumplir ciertos requerimientos volumétricos que son: vacíos de aire, vacíos del agregado mineral (VAM) y vacíos llenos con asfalto. El contenido de vacíos de aire es una propiedad muy importante ya que es utilizada como la base para determinar el contenido de asfalto óptimo de la mezcla.

En SUPERPAVE, el contenido de vacíos de aire de la mezcla de diseño es del 4%.

Para poder realizar un diseño volumétrico se deberán obtener las propiedades volumétricas de la mezcla a partir de la fabricación de especímenes a los cuales se les evalúan sus propiedades volumétricas a partir de una serie de fórmulas secuenciales que se deben de realizar y las cuales se muestran en este documento en la tabla de anexos A-1.



Figura 32 Especímenes de prueba tipo mezcla disgregada.

3.2.1 Parámetros volumétricos

Como se mencionó anteriormente, las propiedades volumétricas que presenta la mezcla asfáltica son fundamentales para determinar el contenido óptimo de asfalto. Los parámetros más importantes son; los vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenados con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (P_{be}), estos proporcionan una indicación del probable comportamiento de la mezcla asfáltica. A continuación en la figura 29 se muestra un diagrama de los componentes de una mezcla asfáltica compactada.

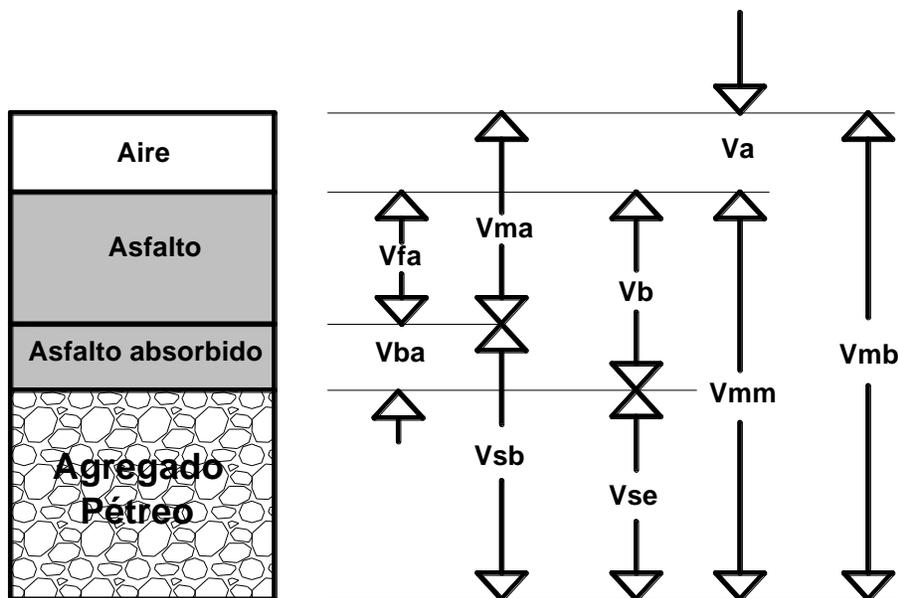


Figura 33 diagrama de componentes de una mezcla asfáltica compactada.

Donde:

V_{ma} = Volumen de vacíos en agregado mineral

V_{mb} = Volumen total de la mezcla asfáltica

V_{mm} = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos

V_{fa} = Volumen de vacíos llenados con asfalto

V_a = Volumen de vacíos de aire

V_b = Volumen de asfalto

V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido

V_{sb} = Volumen de agregado mineral (Gravedad específica de la masa)

V_{se} = Volumen de agregado mineral (Gravedad específica efectiva).

Cabe destacar que el diseño correspondiente a cada una de las relaciones de Filler que se analizan en la presente investigación, se realizó conforme a las especificaciones que dicta SUPERPAVE para una mezcla de alta densidad. Además el diseño se elaboró empleando un asfalto grado PG 76-22, mismo que fue empleado por ser un asfalto modificado con propiedades de durabilidad por encima de un asfalto convencional.

Sumado a lo anterior, el diseño se realizó de acuerdo a la metodología de SUPERPAVE correspondiente para un nivel III en el cual se señala que para un tránsito de más de 30'000,0000 de ejes equivalentes se deberá de compactar la mezcla haciendo uso de un compactador giratorio a $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$ y aplicando una presión de $600 \text{ kPa} \pm 18 \text{ kPa}$. Además se deberá registrar la altura de compactación correspondiente a los 9 giros iniciales, 126 giros considerados de diseño y 204 giros finales.



Figura 34 Espécimen tipo pastilla recientemente fabricado y extraído del molde del compactador giratorio.

3.2.2 Diseños volumétricos de experimentación:

Como se ha hecho mención anteriormente, la presente investigación tomo en consideración obtener tres diseños volumétricos que permitieran diferenciar la importancia de obtener una mezcla asfáltica que contuviera una relación de polvo que se encontrara dentro del rango (0.6 a 1.2), por encima del rango y por debajo del rango.

Los diseños volumétricos resultantes corresponden al adicionar un Filler con la característica de ser de mediana calidad, que es el Filler el cual el ensaye de azul de metileno arrojó un resultado de 9 y que proviene de la trituración del mismo agregado pétreo a emplear en la elaboración de las mezclas asfálticas de experimentación y que además ha sido identificado como basalto.

3.2.2.1 Primer diseño volumétrico:

En la tabla 24 se muestran los resultados de las propiedades volumétricas a evaluar de la mezcla como lo indica la metodología de SUPERPAVE. Además en este primer diseño volumétrico, es evidente que aunque se cumplen todas las propiedades volumétricas una vez que fue encontrado el porcentaje óptimo de asfalto a emplear en la mezcla, la relación de polvo que tiene la mezcla, no cae dentro del rango que indica la metodología SUPERPAVE y en el cual deberá estar, por ello se recalca uno de los objetivos de la presente investigación que es evaluar el desempeño de las mezclas que tengan una relación de polvo que este fuera y por encima del rango que indica SUPERPAVE, además de evaluar el desempeño de las mezclas que contengan una relación de polvo que esté fuera y por debajo del rango indicado por SUPERPAVE, contra aquellas mezclas que cumplan con el rango indicado.

Tabla 24 Resultados de propiedades volumétricas de la mezcla: primer diseño.

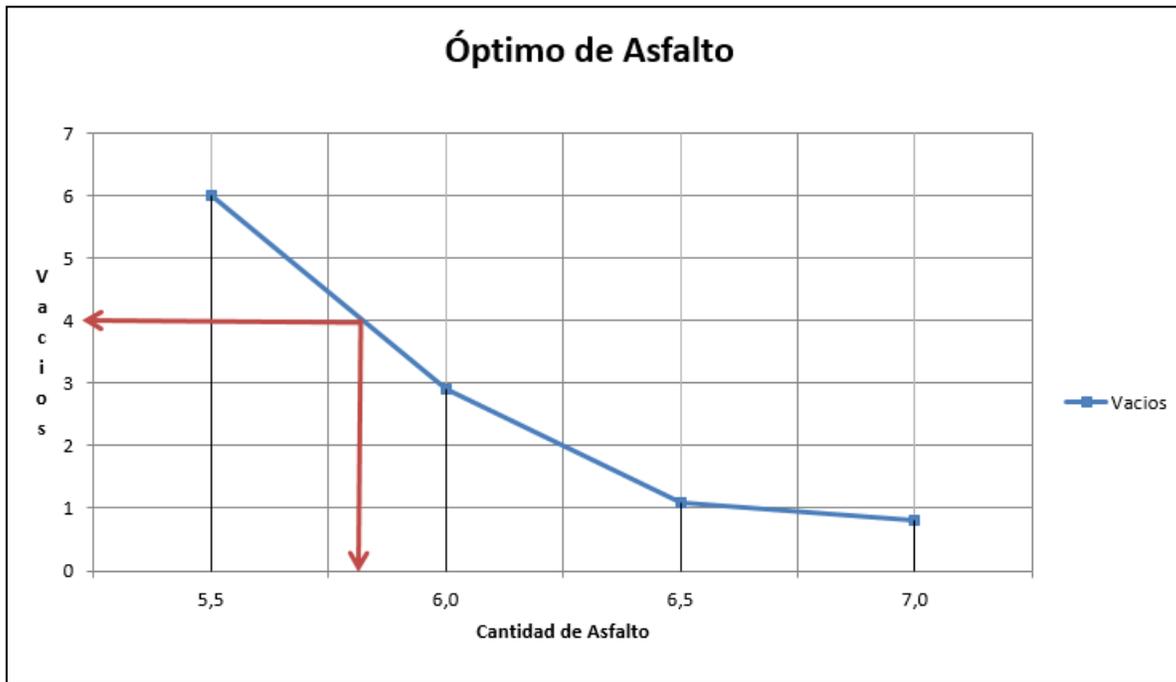
Propiedades Volumétricas y relación de polvo (Dp) Diseño Volumétrico con relación de polvo por encima del rango											
CA	P seco (gr)	P sumergido (gr)	P SSS (gr)	Densidad (Tn/m ³)	Vacíos	Ps	VAM	VFA	Pca	VCAMIX	Dp
5.5	1052	608	1058,5	2,325	6	0,95	13,75	56,45	0,77	30,36	1,53
6	1053	612,5	1056,5	2,372	2,9	0,94	12,43	76,98	0,77	29,30	1,27
6.5	1055	613	1055,5	2,384	1,1	0,94	12,38	91,34	0,76	29,26	1,08
7	1055,8	611,5	1056,5	2,372	0,8	0,93	13,22	93,72	0,76	29,94	0,98
5.8	1051,28	608,3	1056	2,344	4	0,95	13	70	0,77	29,95	1,3
ESPECIFICACIÓN											0,6 - 1,2

Donde:

- CA= Cantidad de Asfalto
- P seco= Peso seco del espécimen en gramos
- P Sumergido= Peso sumergido del espécimen en gramos
- P SSS= Peso del espécimen superficialmente seco estabilizado
- Densidad= Gravedad específica del espécimen.
- Vacíos= Vacíos contenidos en el espécimen
- Ps= Relación que existe entre la cantidad de asfalto adicionada a la mezcla y el peso total de mezcla
- VAM= Vacíos del agregado mineral
- VFA= Vacíos llenos con asfalto
- Pca= Cantidad de asfalto influenciado por el Filler
- VCAMIX= Vacíos en el agregado grueso de la mezcla
- Dp= Relación de polvo

De la tabla 24 se puede observar que inicialmente se procedió a fabricar especímenes con una cantidad de asfalto inicial de 5.5% posteriormente para poder encontrar el % de asfalto óptimo a emplear en la mezcla se fabricaron más especímenes con distintas dosificaciones de asfalto hasta poder encontrar las propiedades volumétricas que más se acerquen a las requeridas por SUPERPAVE y por ende construir una gráfica en la cual se introduzcan los puntos que correspondan a la cantidad de vacíos de la mezcla contra la cantidad de asfalto agregado. Posteriormente ubicar en la curva que den estos puntos la cantidad de asfalto óptimo de la mezcla que proporcione un contenido de vacíos del 4% y así de esta manera evaluar sus propiedades volumétricas y comprobar que efectivamente cumpla por lo estipulado por SUPERPAVE.

A continuación en la gráfica 4, se pueden observar los puntos que fueron necesarios para encontrar la cantidad de asfalto óptimo que necesita agregarse a su correspondiente mezcla dada por la granulometría del agregado pétreo a utilizarse en esta investigación.



Gráfica 4 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto en el primer diseño.

3.2.2.2 Segundo diseño volumétrico:

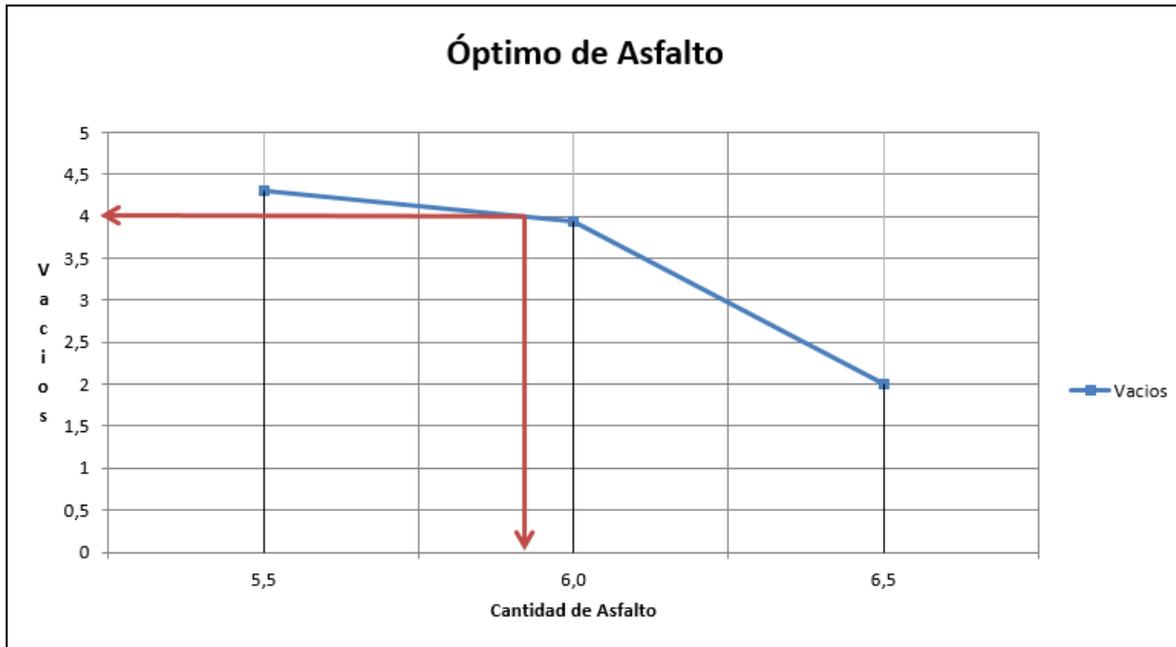
El presente apartado, es similar al anterior, solo que en este fue posible encontrar un diseño volumétrico que satisface totalmente los requerimientos de SUPERPAVE pues cumple con los requerimientos volumétricos más la proporción de polvo cae dentro del rango indicado. A continuación en la tabla 25, se podrán observar los datos que fueron calculados y necesarios para la elaboración de un adecuado diseño volumétrico a partir de la obtención del % óptimo de asfalto que corresponde a la mezcla de este diseño y de la misma manera se incluye la gráfica 5 donde fue posible determinar la cantidad de asfalto óptimo que debía contener esta mezcla.

Tabla 25 Resultados de propiedades volumétricas de la mezcla: segundo diseño

Propiedades Volumétricas y relación de polvo (Dp) Diseño Volumétrico con relación de polvo dentro del rango											
CA	P seco (gr)	P sumergido (gr)	P SSS (gr)	Densidad (Tn/m ³)	Vacíos	Ps	VAM	VFA	Pca	VCAMIX	Dp
5,5	1048,0	607,5	1054,5	2,345	4,3	0,95	13,02	67	0,77	29,78	1,03
6	1048,1	603,3	1054,3	2,324	3,94	0,94	14,11	72	0,77	30,72	0,86
6,5	1056,3	609	1058,5	2,350	2	0,94	14,64	85	0,76	30,28	0,77
5,9	1049,0	607,5	1053,5	2,352	4	0,94	13	69	0,77	30,52	0,9
ESPECIFICACIÓN											0,6 - 1,2

Donde:

- CA= Cantidad de Asfalto
- P seco= Peso seco del espécimen en gramos
- P Sumergido= Peso sumergido del espécimen en gramos
- P SSS= Peso del espécimen superficialmente seco estabilizado
- Densidad= Gravedad específica del espécimen.
- Vacíos= Vacíos contenidos en el espécimen
- Ps= Relación que existe entre la cantidad de asfalto adicionada a la mezcla y el peso total de mezcla
- VAM= Vacíos del agregado mineral
- VFA= Vacíos llenos con asfalto
- Pca= Cantidad de asfalto influenciado por el Filler
- VCAMIX= Vacíos en el agregado grueso de la mezcla
- Dp= Relación de polvo



Gráfica 5 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto en el segundo diseño.

3.2.2.3 Tercer diseño volumétrico

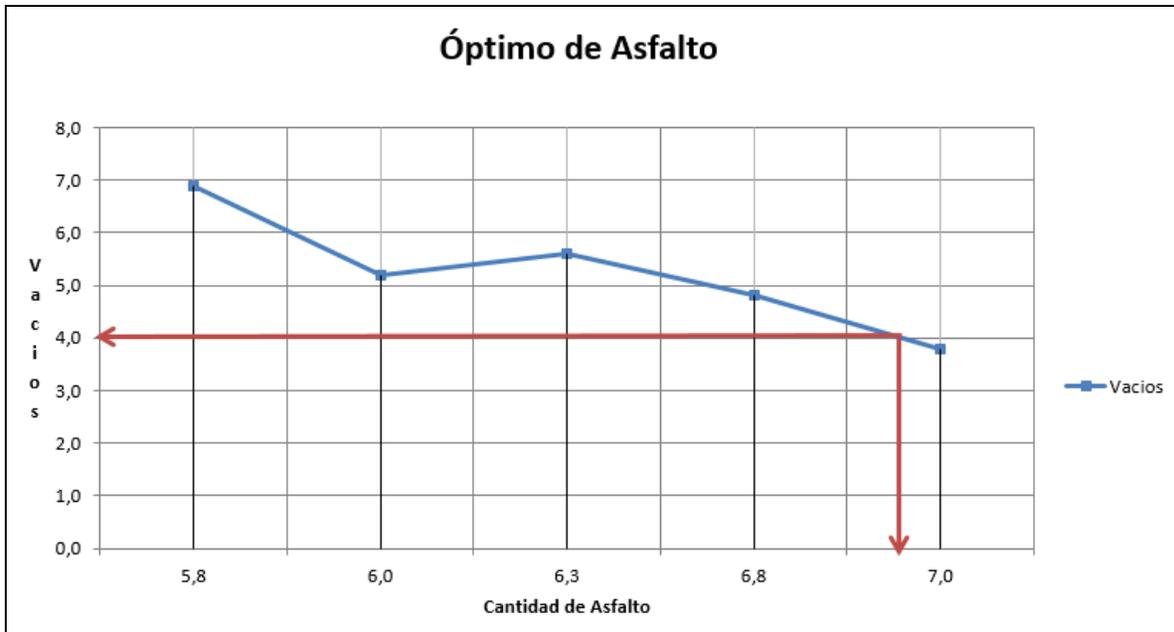
Por último, se muestran los resultados de un tercer diseño volumétrico el cual aunque satisface algunos requerimientos de SUPERPAVE, pero no cumple con el requerimiento de la proporción de polvo, pues en este diseño la relación de polvo que se obtuvo cayó fuera y por debajo del rango que indica SUPERPAVE. A continuación en la tabla 26, se muestran los resultados de este diseño donde además una característica muy notable fue que el %de asfalto óptimo de la mezcla como se puede apreciar en la gráfica 6, se distanció muy por encima del % de asfalto óptimo a emplear en los dos diseños anteriores:

Tabla 26 Resultados de propiedades volumétricas de la mezcla: tercer diseño.

Propiedades Volumétricas y relación de polvo (Dp) Diseño Volumétrico con relación de polvo por debajo del rango											
CA	P seco (gr)	P sumergido (gr)	P SSS (gr)	Densidad (Tn/m3)	Vacíos	Ps	VAM	VFA	Pca	VCA MIX	Dp
5,8	1046,0	597	1056,0	2,279	6,9	0,95	15,70	56,26	0,77	31,94	0,56
6	1047,5	598	1056,5	2,285	5,2	0,94	15,65	66,79	0,77	31,89	0,56
6,3	1052,0	601,5	1059,5	2,297	5,6	0,94	15,43	63,84	0,76	31,72	0,54
6,8	1058,5	602,5	1063,0	2,299	4,4	0,94	15,76	72,28	0,76	31,99	0,52
7,0	1059,0	603	1062,5	2,305	3,8	0,93	15,70	75,57	0,76	31,94	0,48
6,95	1058,5	608,5	1059,0	2,350	4	0,94	14,02	71,63	0,76	30,58	0,5
ESPECIFICACIÓN					4		13	65-75			0,6 – 1,2

Donde:

- CA= Cantidad de Asfalto
- P seco= Peso seco del espécimen en gramos
- P Sumergido= Peso sumergido del espécimen en gramos
- P SSS= Peso del espécimen superficialmente seco estabilizado
- Densidad= Gravedad específica del espécimen.
- Vacíos= Vacíos contenidos en el espécimen
- Ps= Relación que existe entre la cantidad de asfalto adicionada a la mezcla y el peso total de mezcla
- VAM= Vacíos del agregado mineral
- VFA= Vacíos llenos con asfalto
- Pca= Cantidad de asfalto influenciado por el Filler
- VCAMIX= Vacíos en el agregado grueso de la mezcla
- Dp= Relación de polvo



Gráfica 6 Determinación del porcentaje óptimo de asfalto en el tercer diseño.

Como se puede observar en las tablas 24, 25 y 26, al modificar la distribución granulométrica del agregado fino, efectivamente se modifica la relación de polvo contenida en la mezcla y sobre todo se puede observar el cambio en todas las propiedades volumétricas además de que conforme va bajando la relación de polvo se ha hecho evidente la necesidad de adicionar mayor cantidad de cemento asfáltico.

Sin embargo si se comparan los resultados de los diseños en las tablas 24 y 25 vemos que son muy similares sus propiedades, esto se debe a que la relación de polvo entre ambas no es muy distante.

Caso contrario en la tabla 26 se observa que la relación de polvo si es muy distante a la obtenida en las mezclas del primer y segundo diseño y que además, debido a ello la mezcla al no tener la cantidad de finos necesaria para un buen cerrado de la mezcla, se necesitó adicionar una mayor cantidad de cemento asfáltico en la mezcla.

Mencionado lo anterior, se puede definir que efectivamente las mezclas que tienen una relación de polvo que este dentro del rango que dicta SUPERPAVE, tendrán mejores propiedades volumétricas y sobre todo un ahorro en la cantidad de asfalto a emplear en la mezcla. Es por ello la importancia de lo que se muestra en esta investigación pues el contar con mezclas que tengan una relación de polvo fuera de lo que dicta SUPERPAVE puede que no se desempeñen correctamente además de que al necesitar mayor cantidad de cemento asfáltico se traduce en un mayor costo de elaboración de la mezcla.

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de desempeño aplicadas a las mezclas asfálticas elaboradas en la presente investigación con las cuales fue posible observar su comportamiento mecánico y evaluar sus propiedades mecánicas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Pruebas de desempeño en el comportamiento mecánico de la mezcla

Lo importante en un pavimento es que cumpla con el periodo de vida para el cual fue diseñado y sobre todo que se desempeñe de manera correcta una vez que esté expuesto a las condiciones de tránsito y climáticas que son las más destructivas en su caso. Es por eso que en la actualidad las metodologías de diseño de mezclas asfálticas incluyen no sólo la serie de pasos a seguir para obtener una buena mezcla sino que también adicionan pruebas de desempeño que simulen en laboratorio las condiciones críticas y el cómo responderá la mezcla en campo. Por ello SUPERPAVE, como se pudo apreciar en la revisión de la literatura, manifiesta tener tres niveles de diseño de mezcla, mismos que incluyen diferentes ensayos al desempeño de la mezcla que su metodología propone y que a continuación se muestran los resultados que se obtuvieron en la presente investigación.

4.1.1 Efecto de las relaciones de Polvo

La finalidad de la investigación es demostrar cómo se comporta la mezcla resultado de un diseño que considere una relación de polvo dentro, por debajo y por encima del rango indicado por la metodología SUPERPAVE, al hacer una comparativa de los resultados que se obtienen en cuanto al desempeño de mezclas que tengan distintas relaciones de polvo y partiendo de un mismo cemento asfáltico y procedencia mineralógica del agregado pétreo. Con lo anterior se pretende demostrar la importancia que tiene emplear agregados pétreos que cuenten con una distribución granulométrica en la cual se obtengan diseños con relación de polvo favorable y que el diseñador en laboratorio o constructor en campo lo tome a consideración ya que en el caso del constructor, en la mayoría de los casos el Filler se escapa por la chimenea del tambor mezclador y con ello se baja la relación de polvo.

En otro de los casos, por tratar de ahorrar en costos de producción, se disminuyen las cantidades de asfalto que se deberían dosificar a la mezcla y con ello aumenta la relación de polvo. Con estos dos ejemplos se relaciona la investigación y se demuestran a continuación los resultados obtenidos de la experimentación realizada a la mezcla obtenida mediante los tres diseños que implican las distintas relaciones de polvo con lo cual se refleja su comportamiento mecánico y los posibles problemas de deterioro a los que se puedan enfrentar.

4.1.1.1 Susceptibilidad a la humedad TSR (Tensile Strength Ratio)

Uno de los principales deterioros que se intenta prevenir y evitar en los pavimentos es el daño causado por la humedad que es el objetivo principal de aplicar este ensaye pues se basa en las predicciones de la mezcla ante las condiciones de humedad a las que será expuesta y el cómo se comportará ante ello. Por esto SUPERPAVE en su nivel número I indica que además de obtenerse un diseño de mezcla asfáltica se deberán aplicar ensayes de TSR para definir cómo se comportará en el campo una vez que este expuesta ante los agentes climáticos.

El daño que se da al estar expuesto un pavimento ante la humedad, ocurre cuando la fuerza de enlace físico entre el ligante (cemento asfáltico) y los agregados pétreos se debilita por la infiltración de la humedad. Esto da a lugar a una gran variedad de deterioro en el pavimento como baches, grietas, etc.

SUPERPAVE nos indica que para prevenir lo anteriormente mencionado, se debe de realizar el ensaye de susceptibilidad a la humedad TSR mediante la Norma AASHTO T283. La cual consta de determinar la perdida de la resistencia de la mezcla medida mediante la elaboración de especímenes de prueba que deberán contener un porcentaje de 7% +- 0.5% de vacíos.

Mismos que deberán ser seis los cuales se subdividen en dos grupos de tres cada uno los cuales se les denominan acondicionados y no acondicionados.

El grupo de los tres acondicionados son aquellos especímenes que como su nombre lo indica se someten a condiciones especiales para llevar a cabo la prueba y a continuación se describe la metodología a seguir:

- Se saturan al vacío los 3 especímenes con una duración de 5 a 10 minutos aproximadamente a una presión de 10 a 26 in HG.



Figura 35 Especímenes saturados al vacío

- Se envuelven las muestras saturadas con una película de plástico, se vierten 10ml de agua y se colocan dentro de una bolsa de plástico. Posteriormente se colocan los especímenes en un congelador por 16 horas a -18°C . Después se colocan en baño maría durante 24 horas a una temperatura de 60°C y al final son enfriadas en un baño a 25°C durante 2 horas.



Figura 36 Especímenes acondicionados y listos para el ensaye de TSR

- Los 3 especímenes no acondicionados restantes también se meten al baño a temperatura a 25°C. Posteriormente se procede a realizar la prueba en la cual se miden las tensiones indirectas de todas las muestras y por último se obtiene la relación de deformación entre los especímenes acondicionados y no acondicionados.



Figura 37 Especímenes en baño maría.

- La norma indica que el resultado de esta relación deberá ser mayor del 80% para poder considerarse que la mezcla actúa eficientemente ante la susceptibilidad de deformación al daño causado por humedad.



Figura 38 Espécimen y máquina de prueba para TSR

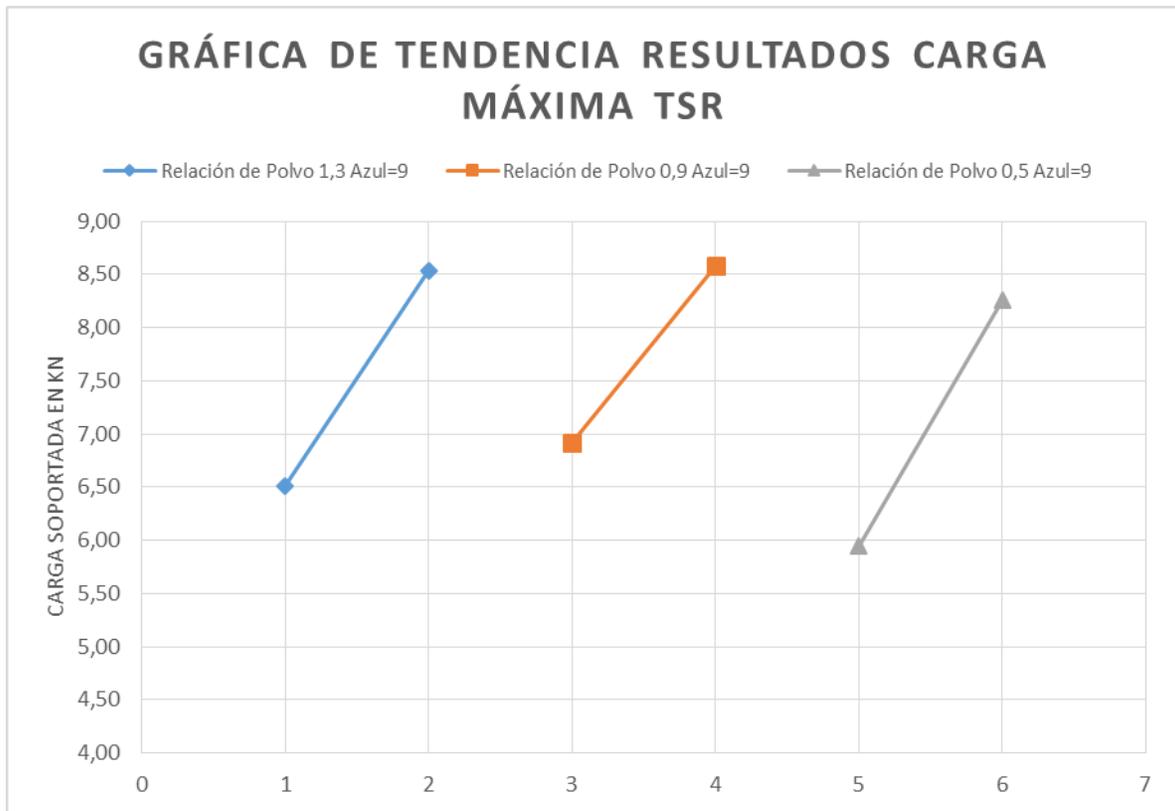
$$TSR = \frac{\textit{Promedio de resultados Acondicionados}}{\textit{Promedio de resultados no Acondicionados}} \quad (6)$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la prueba de TSR para los diseños de mezcla asfáltica obtenidos:

Tabla 27 Resultados TSR (Relación de Polvo).

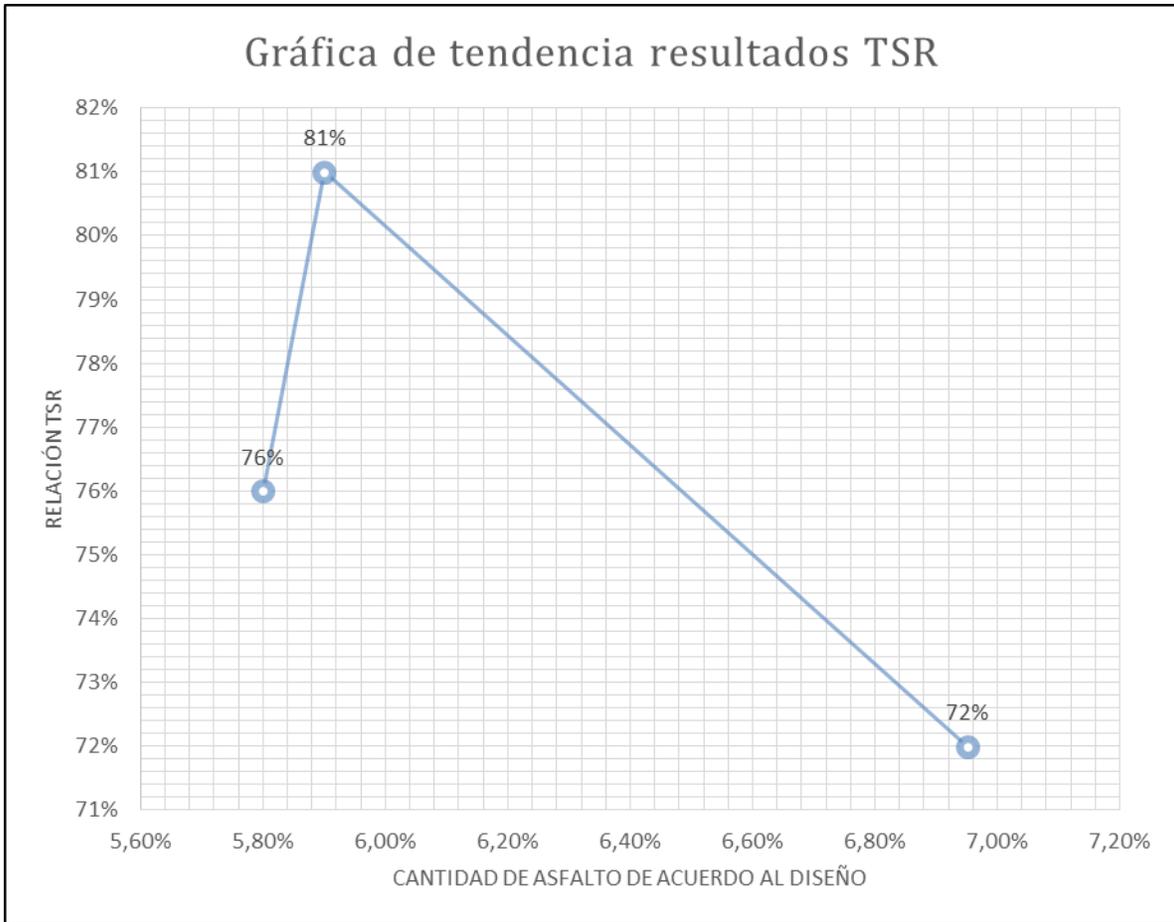
RESULTADOS TSR								
1er DISEÑO C.A. 5,8 %			2do DISEÑO C.A. 5,9%			3er DISEÑO C.A. 6,95%		
Rel. De Polvo= 1,3			Rel. De Polvo= 0,9			Rel. De Polvo= 0,5		
Filler Azul de metileno= 9			Filler Azul de metileno= 9			Filler Azul de metileno= 9		
ACONDICIONADAS		PROMEDIO	ACONDICIONADAS		PROMEDIO	ACONDICIONADAS		PROMEDIO
T1	7,68 kN	6,51 kN	T7	6,86 kN	6,92 kN	T13	6,08 kN	5,94 kN
T2	4,98 kN		T8	6,57 kN		T14	6,13 kN	
T3	6,88 kN		T9	7,33 kN		T15	5,62 kN	
NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO
T4	9,03 kN	8,54 kN	T10	7,93 kN	8,58 kN	T16	7,17 kN	8,26 kN
T5	7,87 kN		T11	8,12 kN		T17	11,13 kN	
T6	8,72 kN		T12	9,69 kN		T18	6,47 kN	
RESULTADO	76%	80% MINÍMO	RESULTADO	81%	80% MINÍMO	RESULTADO	72%	80% MINÍMO

Como se puede apreciar en la tabla 27 los resultados que se obtuvieron y como era de esperarse, son mejores y cumplen con la condición mínima de acuerdo lo que dicta este ensaye el diseño que cuenta con una relación de polvo que se encuentra dentro del rango la cual corresponde a la relación de polvo= 0,9 con una cantidad de asfalto correspondiente al 5,9%. A continuación se muestran dos gráficas en las cuales es posible apreciar el comportamiento de los resultados del ensaye, lo cual es básico para definir que efectivamente la manera en que SUPERPAVE dicta que para obtener un buen diseño de mezcla asfáltica y que se comporte de manera eficiente, esta deberá contener Filler con una relación dentro del rango que propone.



Gráfica 7 Resultados carga máxima TSR (Relación de Polvo).

De la gráfica anterior se puede observar el comportamiento de los especímenes y el cómo soportaron el promedio de carga máxima mediante este ensaye para lo cual se puede apreciar que el primer diseño que corresponde a una relación de polvo de 1,3 muestra resultados no favorables para la prueba, ya que sus resultados están muy dispersos y distantes entre el promedio de los espécimenes acondicionados y no acondicionados. Sin embargo, es notorio el comportamiento uniforme y satisfactorio para el diseño que cuenta con una relación de polvo dentro del rango que indica SUPERPAVE que es de 0,9. Sin embargo a su vez se puede apreciar que la mezcla que tiene una relación de polvo muy por debajo que es de 0,5 se comporta de manera discontinua y con resultados inadecuados para la prueba realizada.



Gráfica 8 Tendencia de resultados TSR (Relación de Polvo).

Por último, en esta gráfica se muestra la línea de tendencia al comportamiento que mostraron las mezclas conforme a lo esperado por la prueba en la cual se puede apreciar que el diseño de mezcla resultante con una relación de polvo por encima del rango casi se acerca a un resultado favorable sin embargo no se obtuvo. Posteriormente se aprecia que si se adentra al rango si se cumple favorablemente el resultado esperado para esta prueba, sin embargo se aprecia que para la mezcla que resulta con un rango que se aleja por debajo del rango también disminuye el resultado de esta prueba por lo que se demuestra la importancia de diseñar mezclas las cuales en su granulometría obtenida se obtengan rangos de relación de polvo por dentro de lo que dicta SUPERPAVE.

Una vez visto lo anterior se cumplen uno de los objetivos e hipótesis de la presente investigación pues se comprueba que las mezclas que se diseñen mediante la metodología SUPĒRPAVE, deberán contener la relación de polvo que indica esta metodología para que estas mezclas se comporten de manera favorable. Sin embargo esto se define de manera parcial ya que estos resultados son solamente para el nivel I de SUPERPAVE por lo que a continuación se muestran los resultados de los niveles posteriores y al final una conclusión definitiva acerca del comportamiento de las mezclas diseñadas para la experimentación de la presente investigación.

4.1.1.2 Susceptibilidad a la deformación permanente (ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo)

Con esta prueba es posible evaluar la susceptibilidad a la deformación permanente que tienen las mezclas en condiciones de humedad y con ello saber si el comportamiento mecánico de la mezcla referente a la resistencia es adecuado. Además sirve para prevenir la formación de roderas debido a la deformación de la mezcla ante la acción de las cargas que le son transmitidas por los vehículos y las temperaturas a las que estará expuesta, identificar mezclas con estructura deficiente y problemas de adherencia entre el agregado pétreo con el cemento asfáltico. Consiste básicamente en inducir la deformación a los especímenes de prueba mediante el movimiento cíclico y concentrado de una rueda metálica cargada a 705N durante 20000 ciclos y una temperatura controlada de 50°C como lo indica la norma AASHTO T-324.



Figura 39 Fotografía tomada durante la ejecución del ensayo de Hamburgo a los espécimenes de prueba.

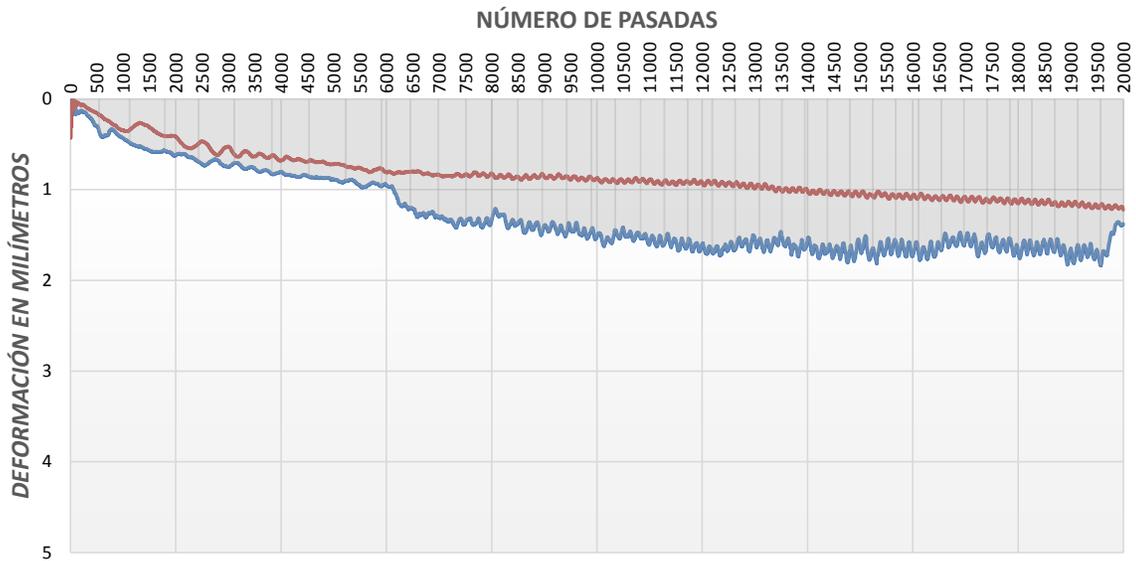
La especificación que indica la norma para esta prueba es que para el tipo de cemento asfáltico empleado en la investigación que es un PG 76-22, corresponde aplicar la prueba a 20000 pasadas y se debe de obtener una deformación máxima de 10 mm.

A continuación en la tabla 28 se muestran los resultados obtenidos de las evaluaciones de la susceptibilidad a la deformación de acuerdo a relación de polvo que corresponde a cada uno de los 3 diseños de la mezcla y posteriormente las gráficas obtenidas ante el comportamiento mecánico de las mismas.

Tabla 28 Resultados del ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo por efecto de las relaciones de Filler.

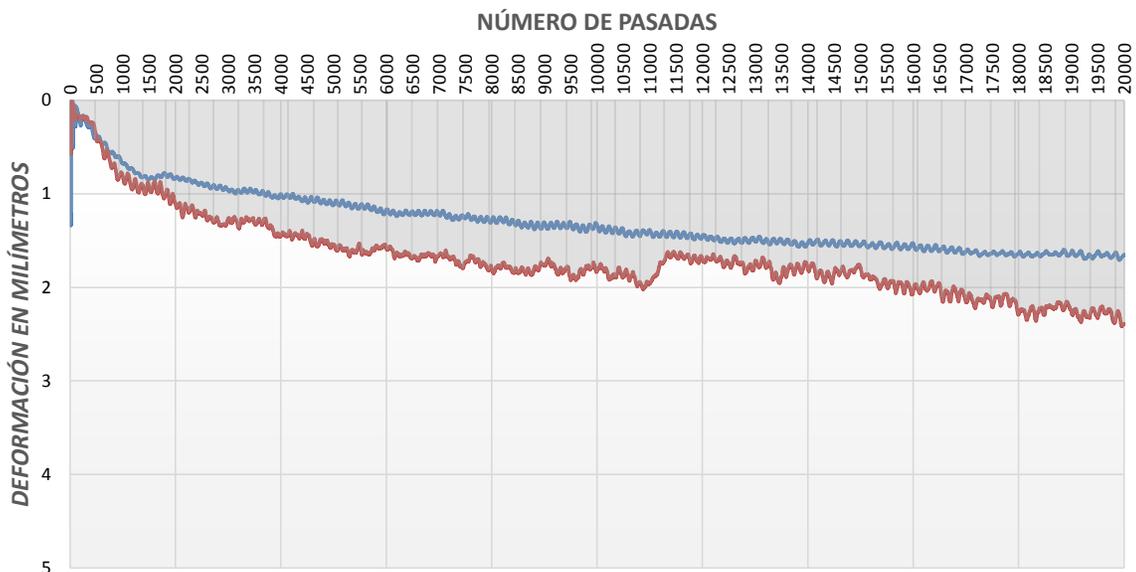
RELACIÓN DE POLVO	CALIDAD DE FILLER (RESULTADO AZUL DE METILENO)	ESPÉCIMEN	RESULTADO (MM)	PROMEDIO DE DEFORMACIÓN (MM)	DEFORMACIÓN MÁXIMA PERMITIDA (MM)
1,3	9	Deformación máxima espécimen 1	1,3773	1,2996	10
1,3	9	Deformación máxima espécimen 2	1,2219		
0,9	9	Deformación máxima espécimen 3	2,3388	1,995	10
0,9	9	Deformación máxima espécimen 4	1,6512		
0,5	9	Deformación máxima espécimen 5	2,7669	3,5538	10
0,5	9	Deformación máxima espécimen 6	4,3407		

GRÁFICA DE DEFORMACIÓN RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

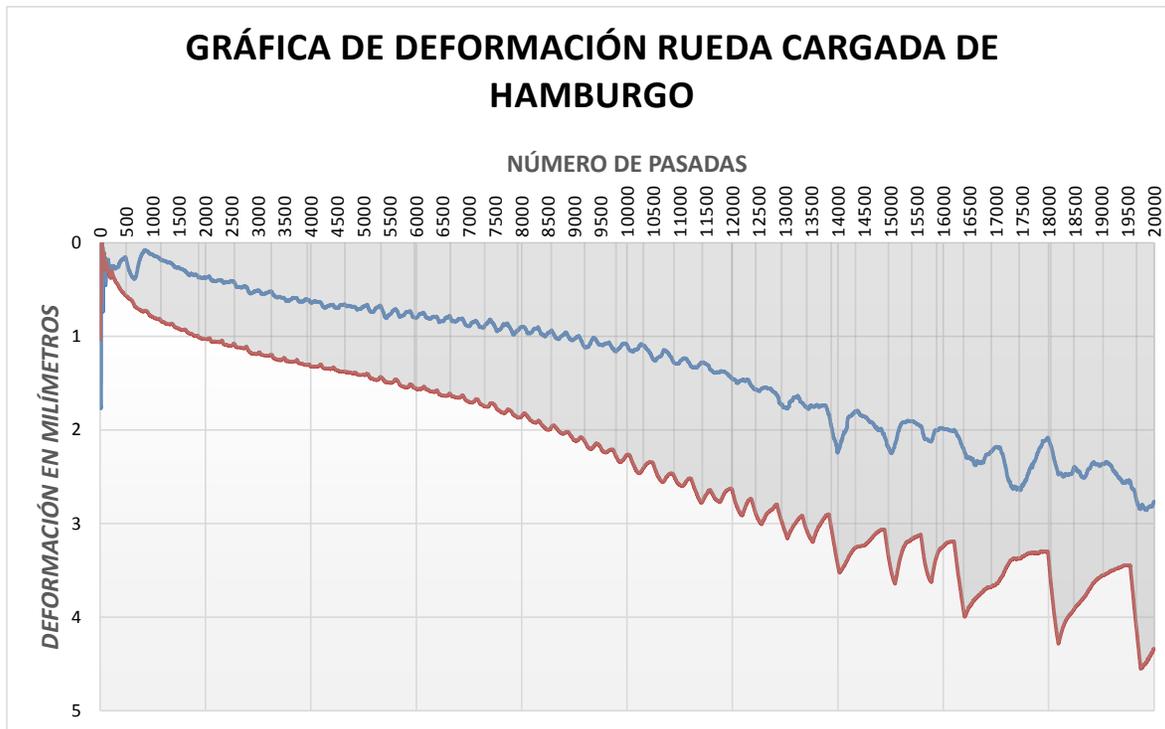


Gráfica 9 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 1,3 Azul= 9.

GRÁFICA DE DEFORMACIÓN RUEDA CARGADA DE HAMBURGO



Gráfica 10 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,9 Azul= 9.



Gráfica 11 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,5 Azul= 9.

Después de evaluar e interpretar los resultados obtenidos de este ensaye a las mezclas de acuerdo a las relaciones de polvo se pudo observar que:

El diseño de mezcla mostró muy buenos resultados ante este ensayo pues fue muy poca la deformación que se obtuvo, esto indica que su comportamiento mecánico es muy bueno pues al parecer la resistencia a la deformación como propiedad mecánica fue muy buena pues ninguno llego a la falla que es una deformación máxima esperada de 10mm. El efecto de las relaciones de polvo no se cumple como se esperaba, ya que los resultados de este ensaye muestran que entre más Filler este contenido en la mezcla, mejor comportamiento mecánico se tendrá.

4.1.1.3 Módulos Dinámicos

Las mezclas asfálticas son consideradas como materiales “visco-elásticos lineales” los cuales definen el módulo complejo (Dinámico E^*) como la relación que existe entre el esfuerzo-deformación bajo una carga sinusoidal (cíclica) continua. En otras palabras el módulo dinámico es definido como la razón de la amplitud del esfuerzo sinusoidal en un tiempo determinado, una frecuencia de carga angular y la amplitud de la deformación sinusoidal al mismo tiempo y frecuencia, lo cual es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{(\sigma_0) \times \sin(\omega t)}{(\varepsilon_0) \times \sin(\omega t - \emptyset)} \quad (7)$$

Donde:

σ_0 = Esfuerzo máximo

ε_0 = Deformación Máxima

\emptyset = Ángulo de fase

ω = Velocidad angular

t = Tiempo

Los valores de los módulos dinámicos que se obtienen en las mezclas son en función de temperatura, carga, envejecimiento, viscosidad, contenido de asfalto, granulometría, tipo de agregados y contenido de vacíos.

Para observar de una mejor manera el comportamiento de la mezcla de acuerdo al efecto de la temperatura y carga aplicada a diferentes frecuencias, se elabora una gráfica la cual se conoce como curva maestra la cual se construye empleando el principio de superposición “tiempo-temperatura”. Para construir la curva maestra de los resultados de los módulos dinámicos obtenidos a diferentes temperaturas y frecuencias, primero se selecciona una temperatura de referencia (generalmente 20 °C) y posteriormente se ajustan los datos de varias temperaturas con respecto al tiempo mediante una relación sigmoideal hasta que los valores se unan en una única función que resulta en una curva.

En los últimos años este tipo de análisis ha ganado importancia desde que se iniciaron las investigaciones de la SHRP para dar origen a SUPERPAVE y el desarrollo de una guía de diseño de pavimentos comúnmente llamada “diseño de pavimentos por métodos mecanicistas”.

Además de la construcción de curvas maestras, se debe graficar también las “isotermas” que son el resultado de los valores del módulo complejo dinámico en función de la temperatura de prueba. En la elaboración de las curvas maestras e isotermas, el módulo que se obtiene a diferentes temperaturas se desplaza mediante un factor de ajuste a la frecuencia o tiempo a la que se tome como referencia, de manera que las isotermas individuales se combinan para formar una sola curva de frecuencia o de tiempo contra la rigidez, de ahí nace la curva maestra.

El ajuste de cada dato de temperatura que se requiere para formar la curva maestra, describe la dependencia del material a la temperatura, mientras que la curva maestra del módulo dinámico como una función del tiempo de carga, describe la dependencia del material al tiempo en que se le aplica la carga.

La manera de modelar la curva maestra se realiza con la siguiente expresión:

$$\text{Log}|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}} \quad (8)$$

Donde:

t_r = Tiempo reducido de carga a la temperatura de referencia.

δ = Valor mínimo de E^*

$\delta + \alpha$ = Valor máximo de E^*

β, γ = Parámetros que describen la forma de la función senosoidal.

El factor de ajuste que superpone tiempo-temperatura se calcula de la siguiente manera:

$$a(T) = \frac{t}{t_r} \quad (9)$$

$$\log(t_r) = \log(t) - \log[a(T)] \quad (10)$$

Donde:

$a(T)$ = Factor de ajuste como una función de la temperatura deseada.

t_r = Tiempo de carga a la temperatura deseada.

t = Tiempo de carga a la temperatura de referencia.

T = Temperatura.

Empleando la ecuación 9 o 10, el tiempo de carga a la temperatura de referencia se puede calcular para cualquier tiempo de carga a cualquier temperatura. Posteriormente el módulo dinámico se puede calcular con la ecuación 8 utilizando el tiempo de carga a la temperatura de referencia.

El procedimiento llevado a cabo para la ejecución de este ensayo y obtener los módulos dinámicos de las distintas mezclas se realizó conforme a la norma AASHTO T 342-11 como se describe a continuación:



Figura 40 Espécimen de módulo dinámico al salir del molde del compactador giratorio.

Se elaboraron 18 espécimenes de acuerdo al método de diseño SUPERPAVE los cuales se dividieron en 9 pares. Cada par elaborado de acuerdo a los 3 diseños volumétricos obtenidos que contienen diferente cantidad de asfalto y relación de polvo. Además de cada Filler adicionado a la mezcla como anteriormente se realizó con los pasados ensayes. Dichos espécimenes cumplieron eficientemente con el tamaño que indica la norma la cual estipula que deberán tener una altura entre 147,5 y 152,5 mm además de un diámetro entre 100 y 104 mm.



Figura 41 Espécimen de módulo dinámico al momento de colocarle los sujetadores de los sensores.

Posteriormente se procedió a colocar los sujetadores de los sensores que llevan por nombre “LDVT” (Linear Variable Differential Transformers) que se utilizan en la prueba y que son indispensables para determinar las deformaciones axiales dato necesario para el cálculo de los módulos dinámicos. Las deformaciones se medirán en dos ubicaciones separadas a 180 grados, tres lugares separados a 120 grados, o cuatro de 90 grados de separación. Debido a que solamente se cuenta con 2 LDVTs se utilizó la configuración de 180 grados como se puede apreciar en la figura 41.

Una vez que se realizó lo anterior se procede a condicionar los especímenes a lo que el método de prueba le llama “Tiempos de equilibrio” el cual consta de someter los especímenes en cierto tiempo a la temperatura de prueba deseada. La siguiente tabla 29 describe la recomendación que la norma hace para cada una de las temperaturas de prueba deseada.

Tabla 29 Tiempos de acondicionamiento de los especímenes de acuerdo a la temperatura de prueba deseada.

Temperatura del espécimen °C	Tiempo a temperatura ambiente h	Tiempo de temperatura anterior al ensayo
-10	Toda la noche	Toda la noche
4	Toda la noche	4 horas o toda la noche
21	1	3
37	2	2
54	3	1

Las siguientes figuras 44 y 43 muestran el acomodo del espécimen y los sensores al momento de ejecutar la prueba.

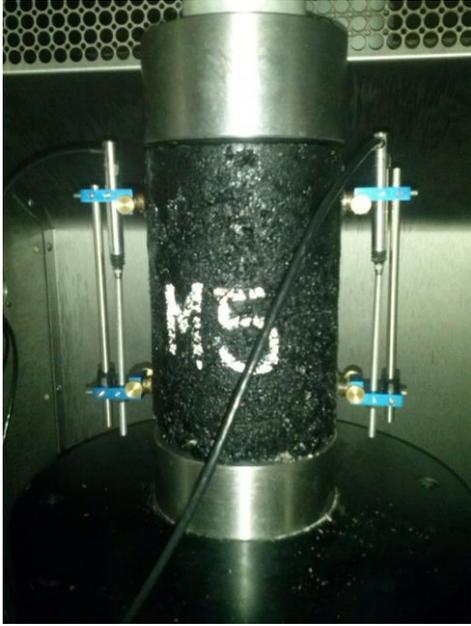


Figura 42 Forma de colocación del espécimen de prueba del ensayo de módulo dinámico con los sensores LDVTs.



Figura 43 Especimen colocado y listo para la ejecución de la prueba dentro de la cámara de ambientación.

Después se probaron los especímenes de menor a mayor temperatura, es decir, desde 0 °C a 40 ° C. De la misma manera a cada temperatura, se le aplicó la carga correspondiente, de mayor a menor frecuencia, es decir, de 10 Hz a 0,1 Hz. Al comienzo de la prueba, se pre acondicionaron los especímenes con 200 ciclos a 10 Hz a un nivel de esfuerzo correspondiente como se muestra en la tabla 30 que es lo que se recomienda en el método de prueba a seguir. Posteriormente la tabla 31 especifica los ciclos que corresponden a cada una de las frecuencias a las cuales se realizará la prueba. Además se debe considerar un periodo de descanso que generalmente es de 2 minutos entre cada una de las frecuencias pero este mismo no debe exceder de los 30 minutos.

Tabla 30 Rango de esfuerzos en función de la temperatura de prueba.

Temperatura °C	Rango de esfuerzo	
	Kpa	psi
-10	1400 a 2800	200 a 400
4	700 a 1400	100 a 200
21	350 a 700	50 a 100
37	140 a 250	20 a 50
54	35 a 70	5 a 10

Tabla 31 Ciclos que deben aplicarse a cada una de las frecuencias de prueba.

Frecuencia Hz	Número de ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

La tabla 32 muestra la temperatura, esfuerzo y número de ciclos a los cuales se sometieron los 18 especímenes durante esta prueba.

Tabla 32 Condiciones de ejecución de la prueba de los 18 especímenes.

Temperatura 0 °C	Esfuerzo 1,1 Mpa
Frecuencia	Ciclos
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15
Temperatura 20 °C	Esfuerzo 0,6 Mpa
Frecuencia	Ciclos
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

Temperatura 40 °C	Esfuerzo 0,25 Mpa
Frecuencia	Ciclos
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

En la figura 44 se aprecia el equipo que fue necesario para realizar este ensayo.



Figura 44 Equipo utilizado para la ejecución de la prueba.

La siguiente figura 45 muestra la interfaz del software que controló el equipo que fue necesario para la ejecución de este ensayo.

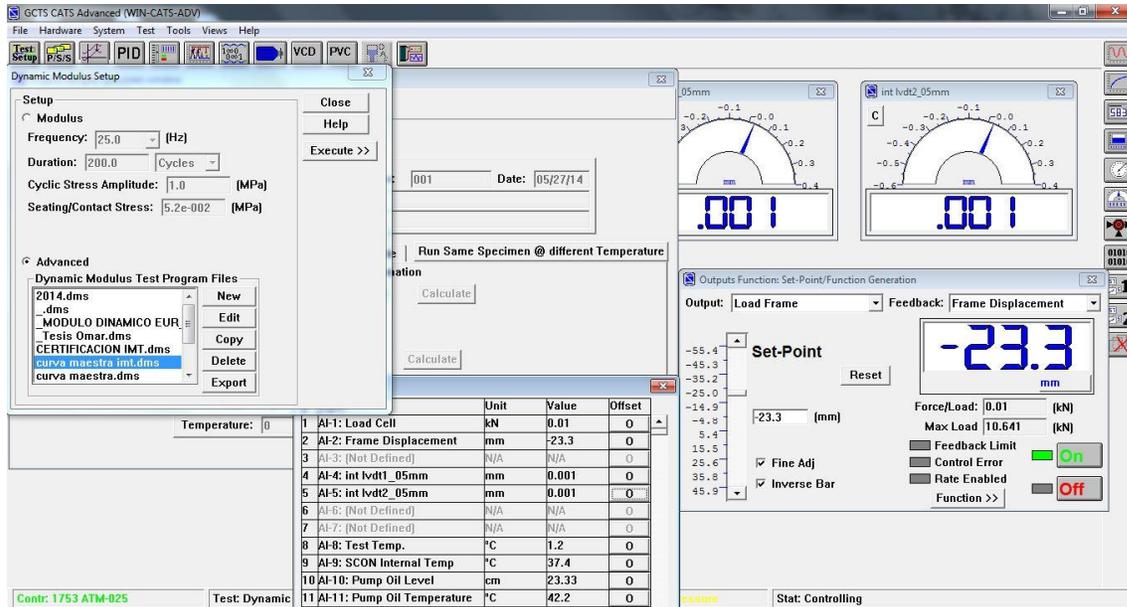


Figura 45 Interfaz del software controlador del equipo necesario para la ejecución de la prueba.

Finalmente se obtuvieron los módulos dinámicos a las temperaturas y frecuencias para los tres pares de los especímenes que corresponden a evaluar el efecto de la relación de polvo y a continuación se muestran las tablas de los resultados obtenidos con sus respectivas gráficas de isotermas y curvas maestras respectivamente.

Tabla 33 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.

<i>Relación de polvo = 1,3 Filler con azul de metileno= 9</i>				
Temperatura °C	F(Hz)	at	(F*at)	E* (MPa)
0	10	1828,05841	18280,5841	36271,256
0	5	1828,05841	9140,29207	34591,868
0	1	1828,05841	1828,05841	30039,116
0	0,5	1828,05841	914,029207	23124,284
0	0,1	1828,05841	182,805841	18304,833
20	10	1	10	14573,8055
20	5	1	5	130910315
20	1	1	1	8318,2845
20	0,5	1	0,5	7361,26
20	0,1	1	0,1	5525,116
40	10	0,00142783	0,01427835	4090,226
40	5	0,00142783	0,00713917	3486,771
40	1	0,00142783	0,00142783	2269,247
40	0,5	0,00142783	0,00071392	1961,317
40	0,1	0,00142783	0,00014278	1435,253

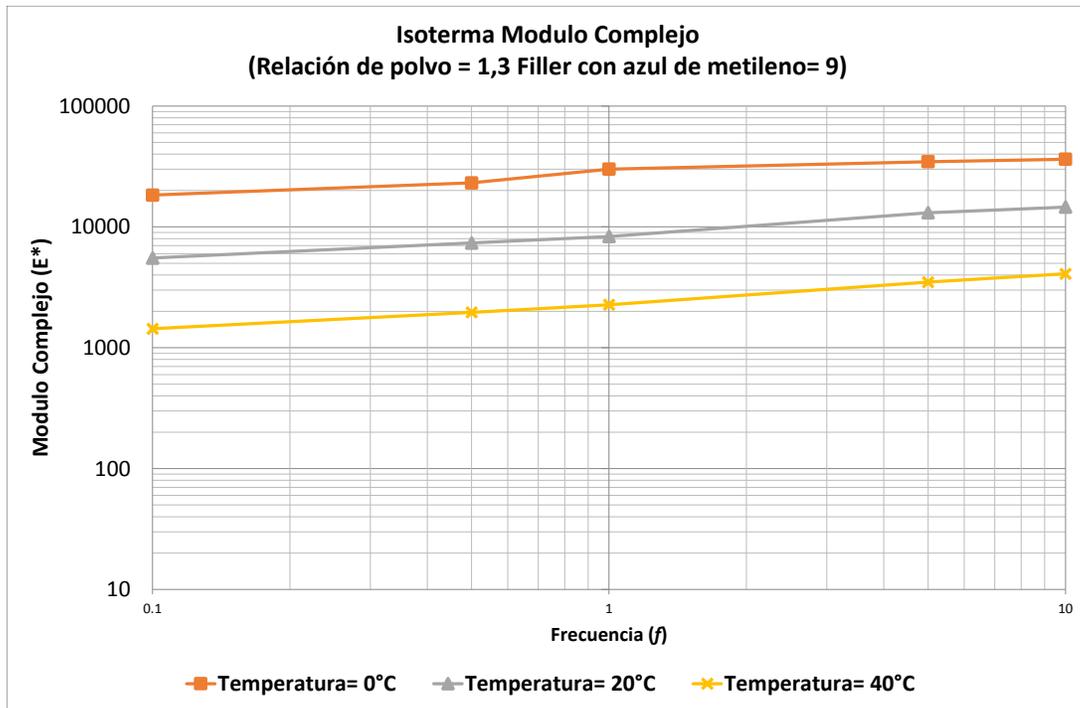
Donde:

F (Hz)= Frecuencia de prueba.

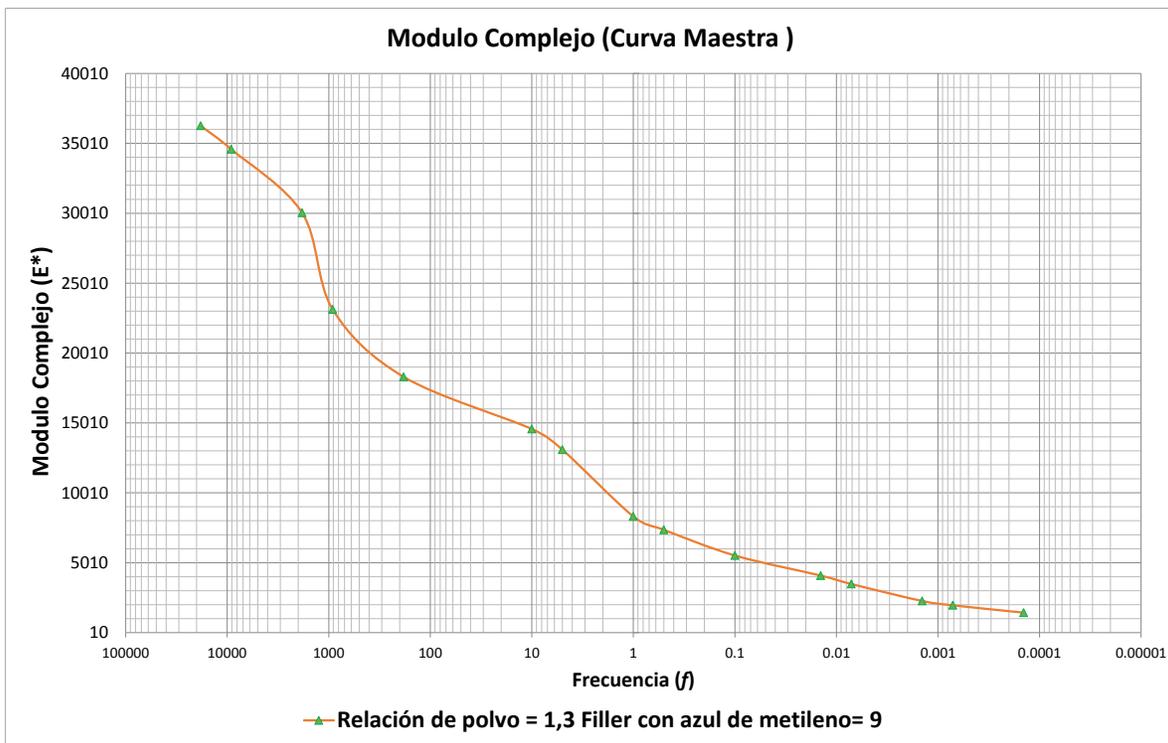
at= Resultado de la relación sigmoïdal de la temperatura deseada tomando como temperatura de referencia 20 °C.

At*at= Calculo necesario para la superposición del tiempo-temperatura del módulo dinámico.

E= Módulo Dinámico en mega pascales.



Gráfica 12 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.



Gráfica 13 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.

Tabla 34 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.

<i>Relación de polvo = 0,9 Filler con azul de metileno= 9</i>				
Temperatura °C	F(Hz)	Δt	(F* Δt)	E* (MPa)
0	10	1828,05841	18280,5841	37311,969
0	5	1828,05841	9140,29207	33391,949
0	1	1828,05841	1828,05841	26146,35
0	0,5	1828,05841	914,029207	23221,709
0	0,1	1828,05841	182,805841	17672,869
20	10	1	10	15541,1225
20	5	1	5	13733,5645
20	1	1	1	9413,2085
20	0,5	1	0,5	8290,3571
20	0,1	1	0,1	6426,736
40	10	0,00142783	0,01427835	3802,743
40	5	0,00142783	0,00713917	3101,839
40	1	0,00142783	0,00142783	1939,283
40	0,5	0,00142783	0,00071392	1620,503
40	0,1	0,00142783	0,00014278	1141,917

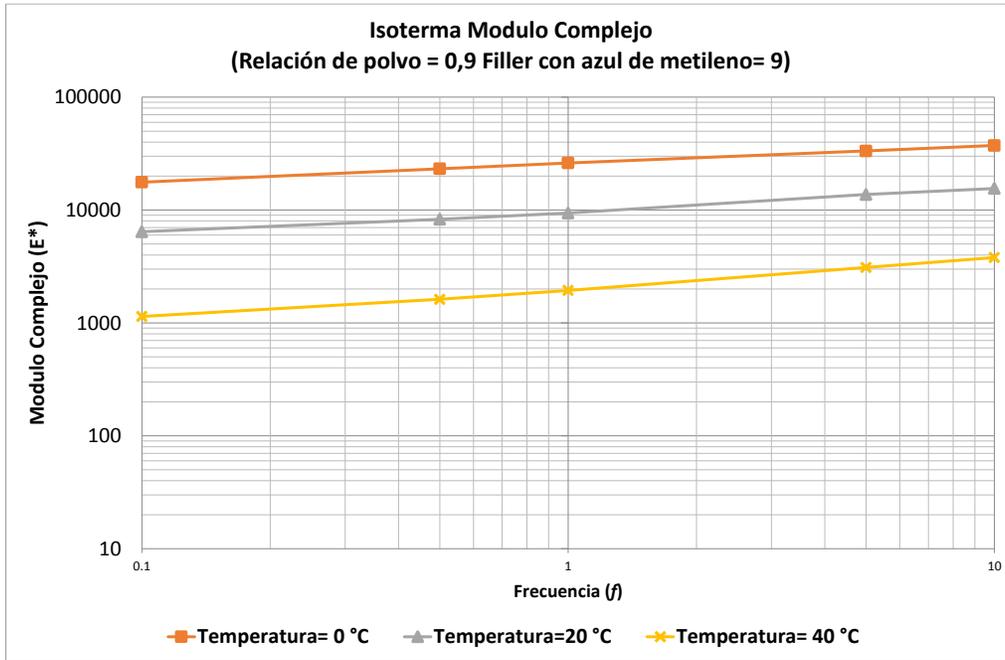
Donde:

F (Hz)= Frecuencia de prueba.

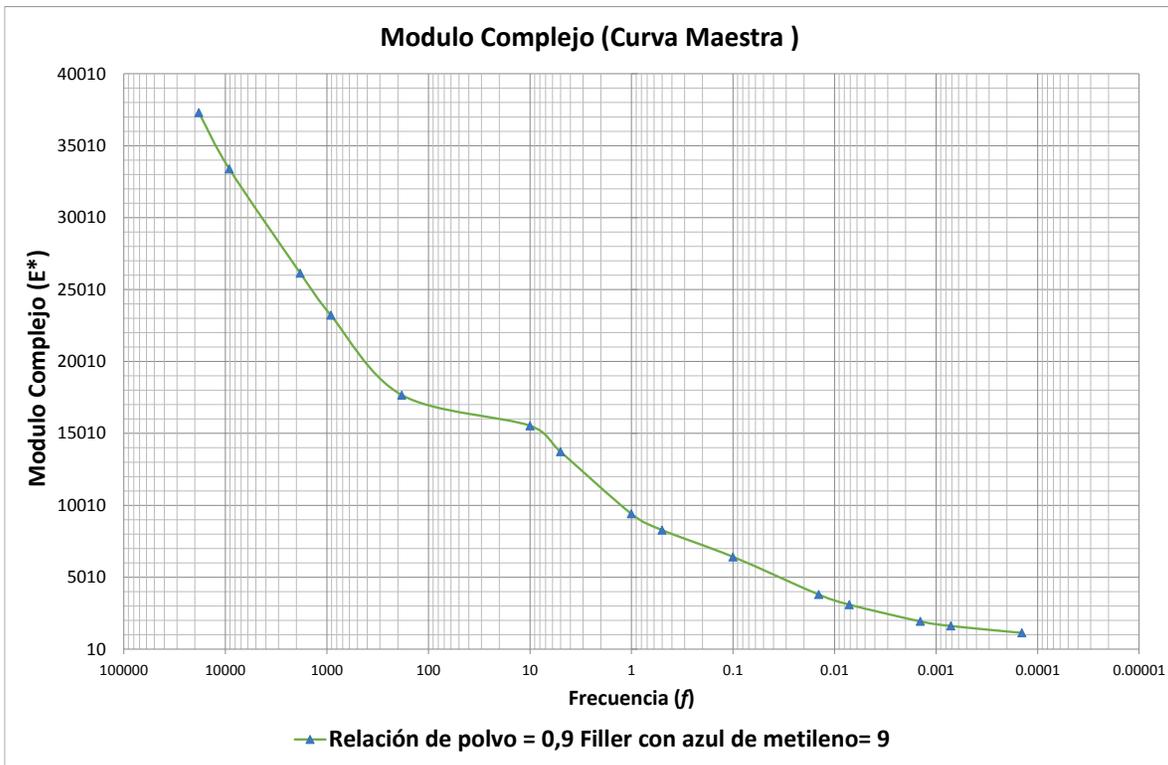
at= Resultado de la relación sigmoideal de la temperatura deseada tomando como temperatura de referencia 20 °C.

At*at= Calculo necesario para la superposición del tiempo-temperatura del módulo dinámico.

E= Módulo Dinámico en mega pascales.



Gráfica 15 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.



Gráfica 14 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.

Tabla 35 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.

<i>Relación de polvo = 0,5 Filler con azul de metileno= 9</i>				
Temperatura °C	F(Hz)	Δt	$(F*\Delta t)$	E* (MPA)
0	10	1828,05841	18280,5841	27609,313
0	5	1828,05841	9140,29207	24393,574
0	1	1828,05841	1828,05841	21200,006
0	0,5	1828,05841	914,029207	19582,238
0	0,1	1828,05841	182,805841	15700,91
20	10	1	10	9103,753
20	5	1	5	7854,667
20	1	1	1	5733,68
20	0,5	1	0,5	4947,476
20	0,1	1	0,1	3642,666
40	10	0,00142783	0,01427835	3439,11
40	5	0,00142783	0,00713917	2849,834
40	1	0,00142783	0,00142783	1879,017
40	0,5	0,00142783	0,00071392	1643,278
40	0,1	0,00142783	0,00014278	1298,515

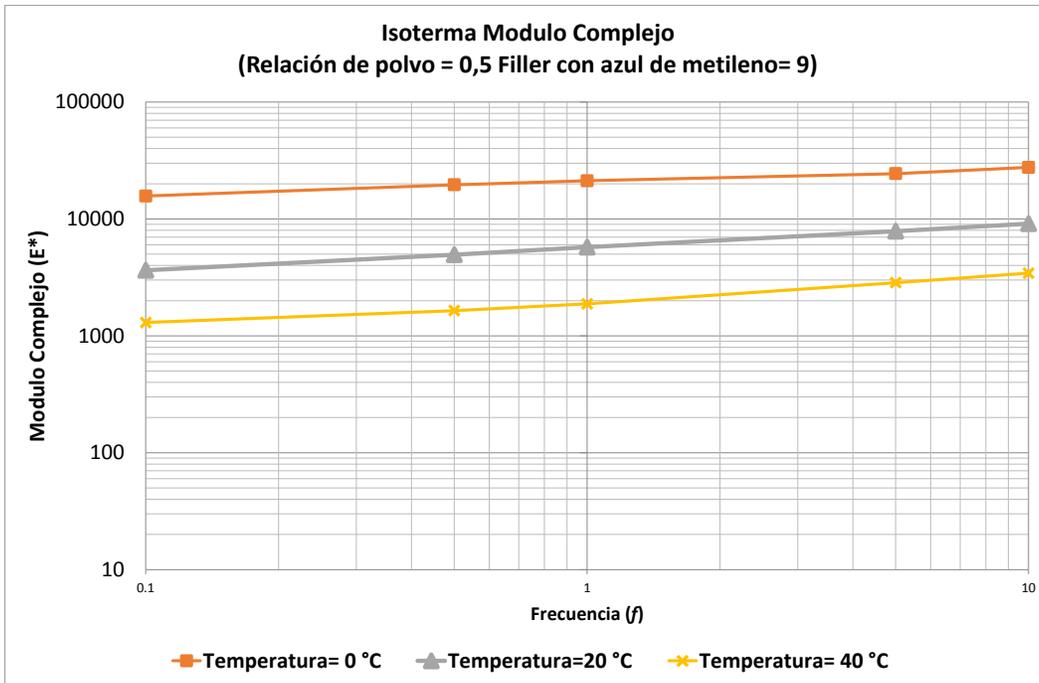
Donde:

F (Hz)= Frecuencia de prueba.

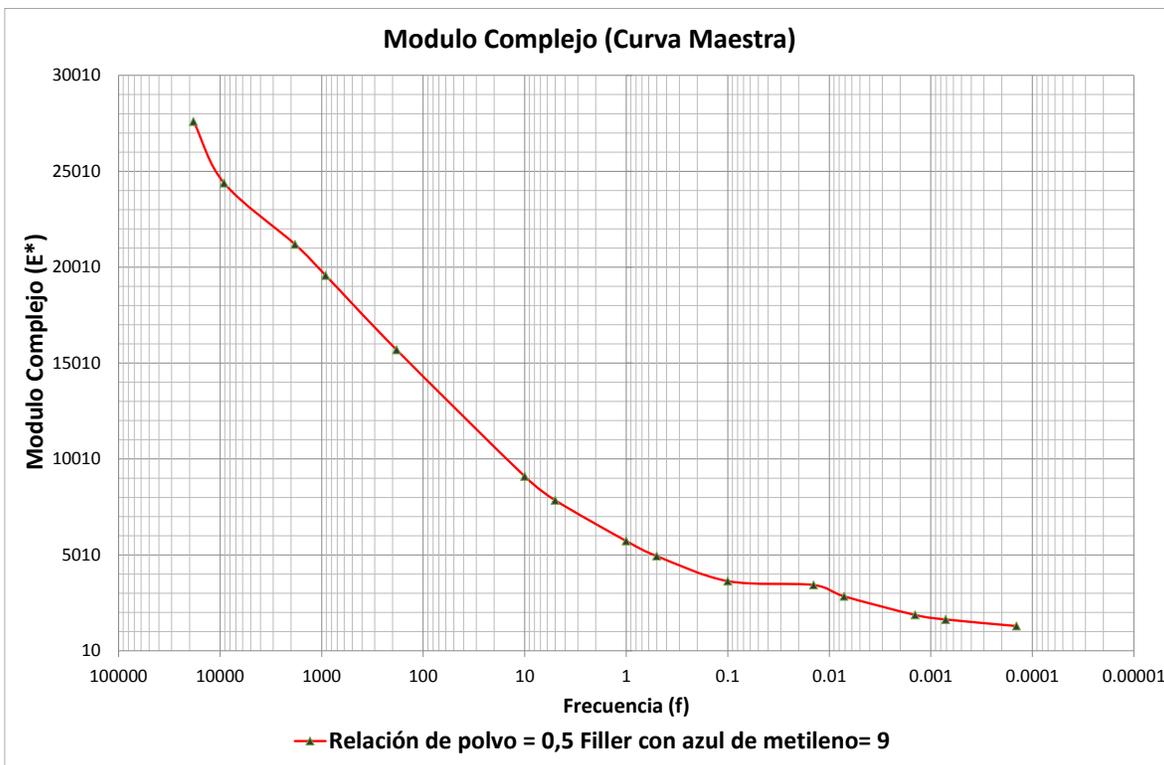
at= Resultado de la relación sigmoideal de la temperatura deseada tomando como temperatura de referencia 20 °C.

At*at= Calculo necesario para la superposición del tiempo-temperatura del módulo dinámico.

E= Módulo Dinámico en mega pascales.



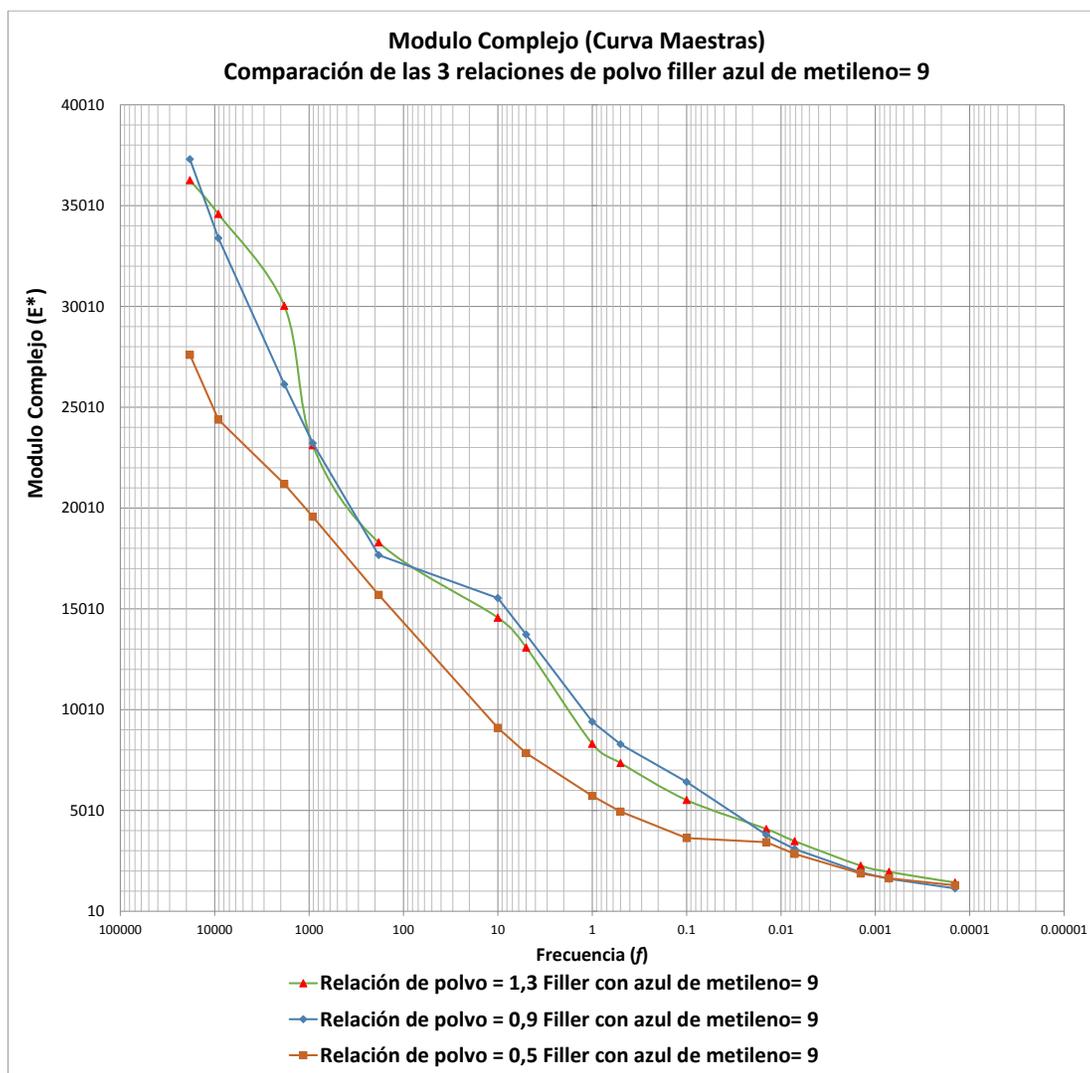
Gráfica 17 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.



Gráfica 16 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 9.

Con base a los resultados anteriormente mostrados en las ultimas tablas y gráficas, se pudo observar que los resultados no son los que se esperaban pues el efecto de las relaciones de polvo se podría decir que se cumple para la mezcla a la cual se le adicionó un Filler con resultado de azul de metileno de 9 mg/g, pero no es tan marcado como en los 2 ensayos anteriores ya que aparentemente la mezcla que tiene una relación de polvo de 1,3 se comporta de manera similar a la mezcla que tiene una relación de polvo de 0,9 .

A continuación en la siguiente gráfica se agrupan las 3 curvas maestras donde se aprecia de mejor manera los resultados obtenidos.



Gráfica 18 Comparación de resultados entre curvas maestras referente al efecto de las relaciones de polvo.

4.1.2 Efecto del tipo de Filler

Otro de los objetivos de esta investigación es comprobar que el emplear en la mezcla Filler de buena calidad ayuda a obtener comportamiento mecánico favorable. En SUPERPAVE se establece que para medir la calidad de un Filler se deberá de aplicar la prueba de azul de metileno con la cual se hace una estimación del grado de reactividad del mismo por lo que a continuación se muestran los resultados obtenidos para los distintos ensayos que predicen el comportamiento de la mezcla a partir de los tres diseños de mezcla obtenidos y adicionando a cada uno de ellos Filler de distinta naturaleza mineralógica y calidad.

La finalidad de agregar en los diseños de mezcla Filler de distinta calidad es para ver la reacción que se tiene con el cemento asfáltico y el agregado pétreo. Además de ser uno de los objetivos de esta investigación corroborar que si en la mezcla se adiciona Filler de mejor calidad que el obtenido de manera directa del agregado pétreo utilizado, la mezcla se comporta de mejor manera. El método utilizado para adicionar el Filler fue simplemente adicionar la fracción que fue determinada en los 3 diseños resultantes de mezcla. A continuación se muestran los ensayos y resultados obtenidos sobre esta experimentación.

4.1.2.1 Susceptibilidad a la humedad (TSR)

Al igual que en el apartado anterior: 4.1.1.1, se siguió la misma metodología de prueba. Sin embargo cabe mencionar que para realizar este ensaye se elaboraron 54 especímenes de prueba de los cuales se diferenció por utilizar mezclas resultantes de los tres diseños obtenidos y adicionando tres Filler distintos que corresponden a:

- Filler proveniente del agregado pétreo empleado en las mezclas que se caracteriza como basalto y con un resultado a la prueba de azul de metileno de 9 mg/g.
- Filler externo identificado como carbonato de calcio y con un resultado a la prueba de azul de metileno de 2 mg/g.
- Filler externo proveniente de un agregado pétreo compuesto por 50% de granito y 50% de tepetate (limo arenoso) que cuenta con un resultado a la prueba de azul de metileno de 32 mg/g.

A continuación en la siguiente tabla 36 se muestran los resultados obtenidos en este ensaye:

Tabla 36 Resultados TSR (Diseños de mezcla con diferente Filler).

RESULTADOS TSR									
1er DISEÑO C.A.5,8 % R.P.=1,3			2do DISEÑO C.A. 5,9% R.P.=0,9			3er DISEÑO C.A. 6,95% R.P.= 0,5			
Filler Azul de metileno= 9			Filler Azul de metileno= 9			Filler Azul de metileno= 9			
ACONDICIONADAS		PROMEDIO	ACONDICIONADAS		PROMEDIO	ACONDICIONADAS		PROMEDIO	
T1	7,68 kN	6,51 kN	T7	6,86 kN	6,92 kN	T13	6,08 kN	5,94 kN	
T2	4,98 kN		T8	6,57 kN		T14	6,13 kN		
T3	6,88 kN		T9	7,33 kN		T15	5,62 kN		
NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	
T4	9,03 kN	8,54kN	T10	7,93 kN	8,58 kN	T16	7,17 kN	8,26 kN	
T5	7,87 kN		T11	8,12 kN		T17	11,13 kN		
T6	8,72 kN		T12	9,69 kN		T18	6,47 kN		
RESULTADO	76%	80% MINÍMO	RESULTADO	81%	80% MINÍMO	RESULTADO	72%	80% MINÍMO	
1er DISEÑO C.A.5,8 % R.P.=1,3			2do DISEÑO C.A. 5,9% R.P.=0,9			3er DISEÑO C.A. 6,95% R.P.= 0,5			
Filler Azul de metileno= 2			Filler Azul de metileno= 2			Filler Azul de metileno= 2			
ACONDICIONADAS		RESULTADO	ACONDICIONADAS		RESULTADO	ACONDICIONADAS		RESULTADO	
T19	7,26 kN	7,00 kN	T25	7,41 kN	7,37 kN	T31	7,07 kN	7,04 kN	
T20	6,86 kN		T26	7,53 kN		T32	7,32 kN		
T21	6,88 kN		T27	7,17 kN		T33	6,73 kN		
NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	
T22	8,59 kN	8,32 kN	T28	8,3 kN	8,60 kN	T34	8,88 kN	8,45 kN	
T23	8,17 kN		T29	8,26 kN		T35	7,92 kN		
T24	8,21 kN		T30	9,24 kN		T36	8,56 kN		
RESULTADO	84%	80% MINÍMO	RESULTADO	86%	80% MINÍMO	RESULTADO	83%	80% MINÍMO	
1er DISEÑO C.A.5,8 % R.P.=1,3			2do DISEÑO C.A. 5,9% R.P.=0,9			3er DISEÑO C.A. 6,95% R.P.= 0,5			
Filler Azul de metileno= 32			Filler Azul de metileno= 32			Filler Azul de metileno= 32			
ACONDICIONADAS		RESULTADO	ACONDICIONADAS		RESULTADO	ACONDICIONADAS		RESULTADO	
T37	6,21 kN	5,63 kN	T43	6,99 kN	6,26 kN	T49	6,28 kN	5,66 kN	
T38	5,55 kN		T44	5,99 kN		T50	5,52 kN		
T39	5,12 kN		T45	5,81 kN		T51	5,17 kN		
NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	NO ACONDICIONADAS		PROMEDIO	
T40	7,99 kN	8,68 kN	T46	9,25 kN	8,40 kN	T52	7,77 kN	7,42 kN	
T41	11,13 kN		T47	8,02 kN		T53	7,47 kN		
T42	6,92 kN		T48	7,93 kN		T54	7,03 kN		
RESULTADO	65%	80% MINÍMO	RESULTADO	75%	80% MINÍMO	RESULTADO	76%	80% MINÍMO	

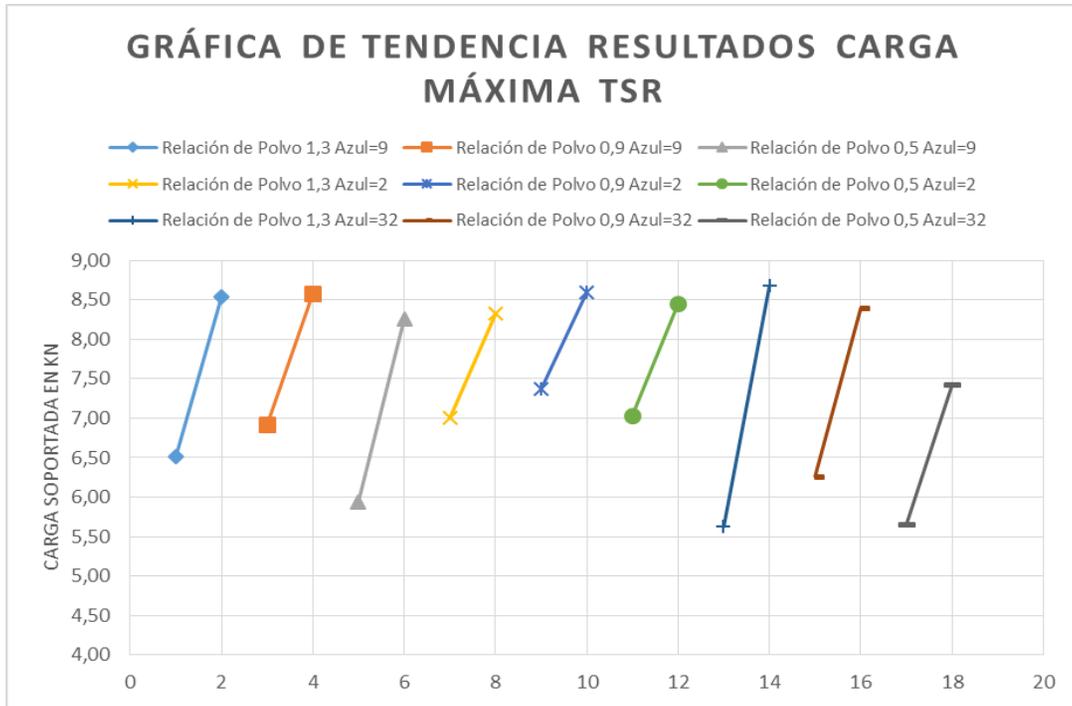
De la tabla 36 se puede apreciar que aunque se adicionó diferente Filler a la granulometría resultante de los 3 distintos diseños de mezcla asfáltica, se cumple efectivamente la condición de que aquellas mezclas que cuenten con una relación de polvo dentro del rango que dicta SUPERPAVE se comportan de mejor manera.

Sin embargo esto se puede decir que solo aplica en las mezclas que cuentan con un Filler adecuado, aquel que mediante la prueba de azul de metileno no arroje un resultado mayor de 12 mg/g ya que como se aprecia en la tabla 36 en la mezcla que contiene Filler con resultado en azul de metileno de 32 mg/g no aplica esta condición ya que los resultados que se observan es que conforme baja la relación de polvo mejora el comportamiento de la mezcla ante esta prueba.

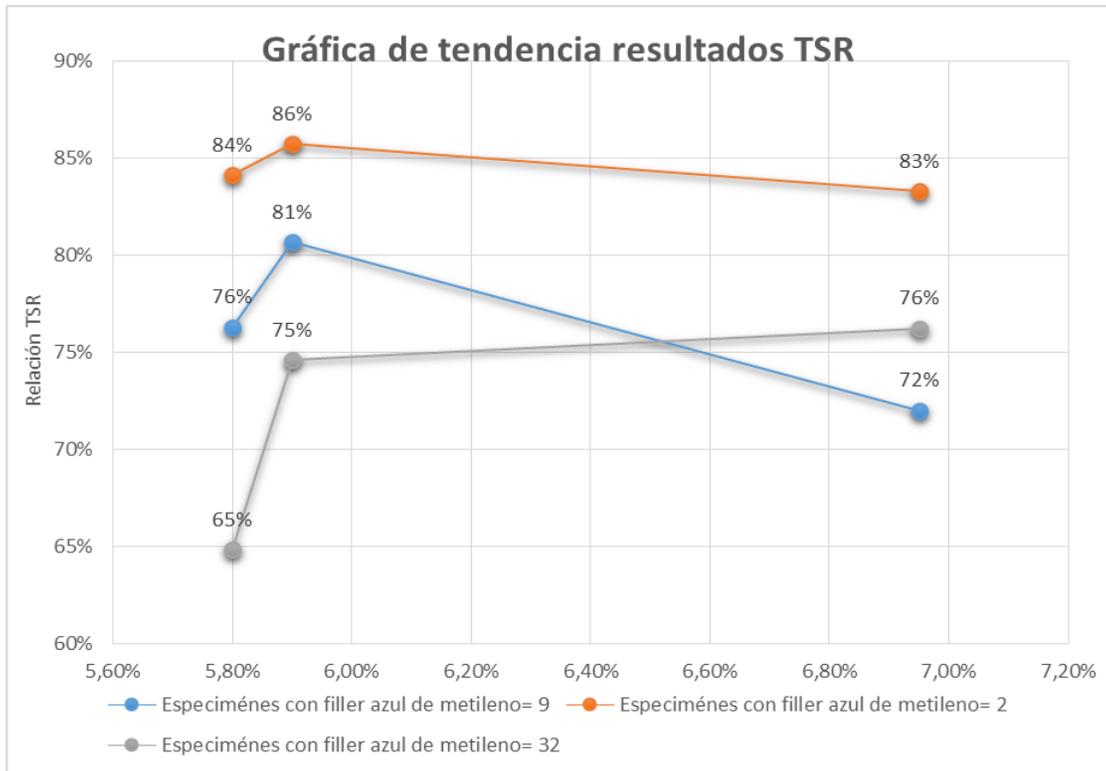
Como se puede apreciar en la tabla 36, los resultados que se obtuvieron al emplear un Filler con calidad de azul de metileno de 9 mg/g con respecto al carbonato de calcio que se empleó como Filler con azul de metileno de 2 mg/g, si se mejoraron considerablemente los resultados obtenidos. Caso contrario a la mezcla en la cual se le adiciono un Filler considerado de mala calidad pues cuenta con un azul de metileno de 32 mg/g, se obtuvieron muy malos resultados.

Como era de esperarse, se cumple efectivamente la condición que indica que se deben emplear granulometrías de las cuales en el diseño se obtenga una relación de polvo dentro del rango indicado por SUPERPAVE, sin embargo se da una controversia pues si se analizan los resultados obtenidos de la mezcla que cuenta con un Filler de calidad azul de metileno de 32 mg/g, se esperaría que el efecto de las relaciones de polvo sea similar al de las otras dos mezclas y en este caso no es así.

A continuación en las siguientes gráficas se aprecia de mejor manera el comportamiento de las mezclas resultantes de esta experimentación y por lo que posteriormente se deberán analizar los resultados obtenidos a los siguientes ensayos que se le realicen a las mezclas.



Gráfica 19 Resultados TSR (Diseños de mezcla con diferente Filler).



Gráfica 20 Tendencia de resultados al ensaye de TSR correspondiente a los diseños de mezcla a los que se les adiciono Filler de distinta naturaleza mineralógica.

Con la gráfica anterior se puede apreciar como la calidad del Filler que se le adicionó a los distintos diseños de mezcla permitió que la durabilidad de esta mejorara y *por qué* los resultados que se obtuvieron en TSR.

Otra de las cuestiones es que los Filler que corresponden al del basalto y al combinado con tepetate parecen actuar de manera distinta ya que al parecer conforme se obtenga una relación de polvo menor, se obtienen mejores resultados, lo que lleva a complementar que al emplear un Filler de mala calidad en la mezcla, esta no se comportará de buena manera.

4.1.2.2 Susceptibilidad a la deformación permanente (ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo)

Continuando con la evaluación del desempeño de la mezcla y su comportamiento mecánico, se elaboraron especímenes de prueba para el ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo de acuerdo a los 3 diseños de mezcla con su correspondiente relación de polvo pero ahora con la finalidad de evaluarlas de acuerdo a la calidad del Filler que se les adicionó y que ya se hizo mención anteriormente.



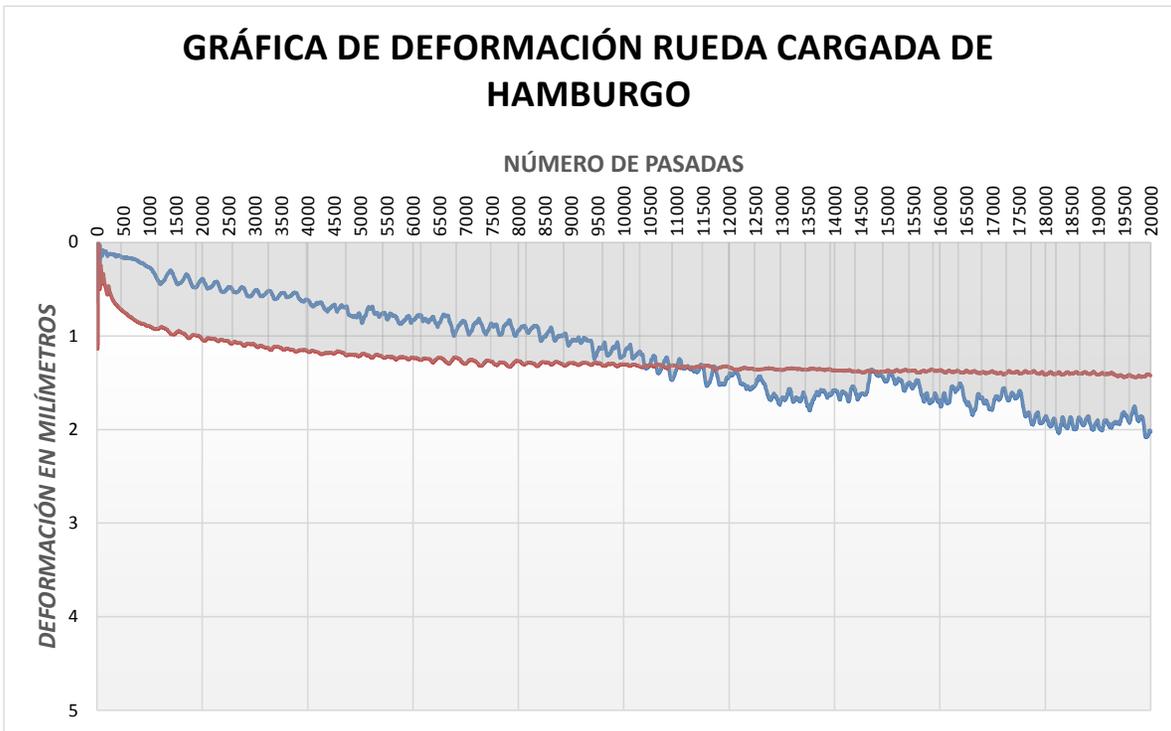
Figura 46 Fotografía tomada a los especímenes durante la ejecución de la prueba.

La metodología de prueba para realizar el ensayo de rueda cargada de Hamburgo para evaluar el efecto del tipo de Filler contenido en la mezcla, se siguió la misma metodología de prueba AASHTO T-324.

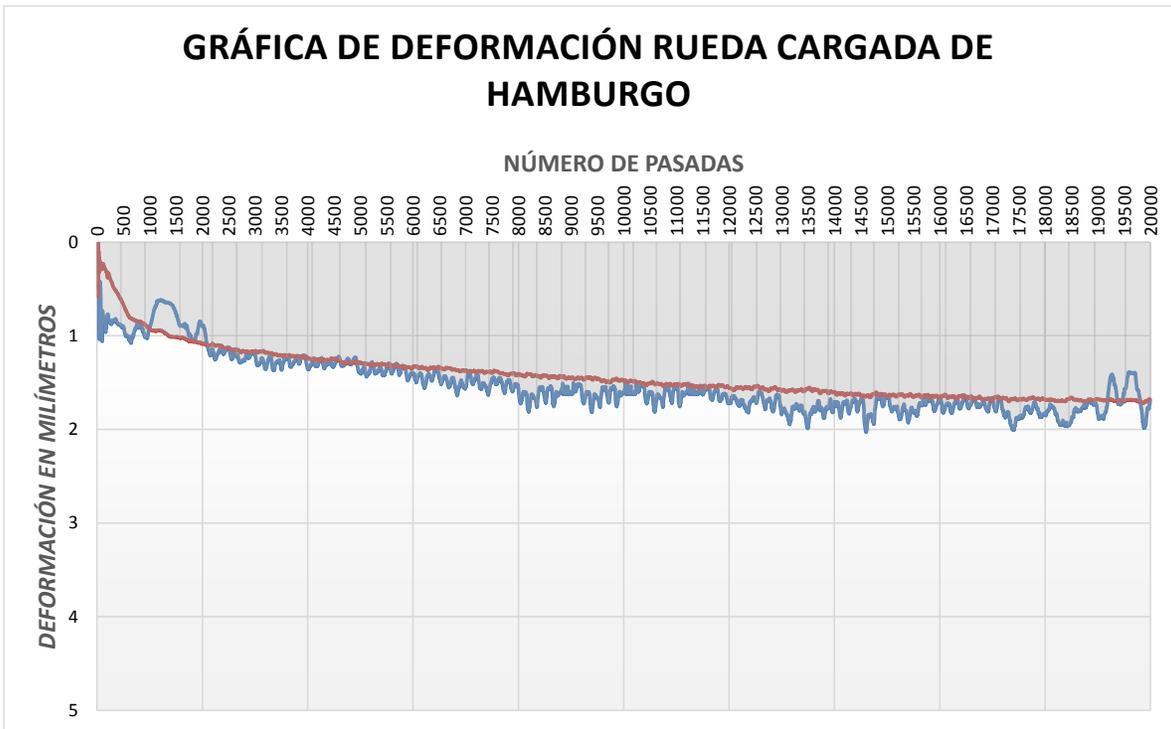
A continuación se muestran los resultados obtenidos en la tabla 37 que corresponden a los 3 diseños con diferente relación de Filler y 3 Filler de distinta calidad, además de las gráficas restantes obtenidas sobre esta experimentación:

Tabla 37 Resultados de los ensayos de Rueda Cargada de Hamburgo por efecto de la calidad de Filler agregado a la mezcla.

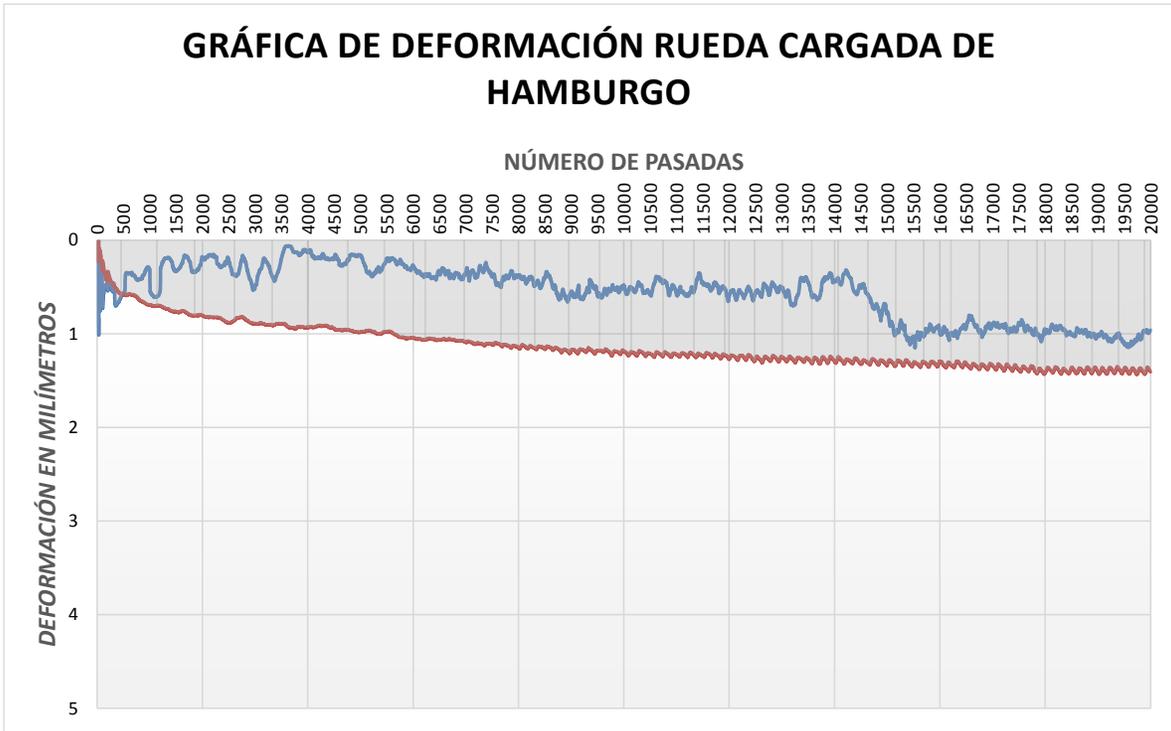
RELACIÓN DE POLVO	CALIDAD DE FILLER (RESULTADO AZUL DE METILENO)	ESPÉCIMEN	RESULTADO (MM)	PROMEDIO DE DEFORMACIÓN (MM)	DEFORMACIÓN MÁXIMA PERMITIDA (MM)
1,3	9	Deformación máxima espécimen 1	1,3773	1,2996	10
1,3	9	Deformación máxima espécimen 2	1,2219		
0,9	9	Deformación máxima espécimen 3	2,3388	1,995	10
0,9	9	Deformación máxima espécimen 4	1,6512		
0,5	9	Deformación máxima espécimen 5	2,7669	3,5538	10
0,5	9	Deformación máxima espécimen 6	4,3407		
1,3	2	Deformación máxima espécimen 7	2,0181	1,7202	10
1,3	2	Deformación máxima espécimen 8	1,4223		
0,9	2	Deformación máxima espécimen 9	1,7002	1,6906	10
0,9	2	Deformación máxima espécimen 10	1,6811		
0,5	2	Deformación máxima espécimen 11	0,9597	1,1830	10
0,5	2	Deformación máxima espécimen 12	1,4062		
1,3	32	Deformación máxima espécimen 13	2,5827	2,1645	10
1,3	32	Deformación máxima espécimen 14	1,7463		
0,9	32	Deformación máxima espécimen 15	2,3108	2,3940	10
0,9	32	Deformación máxima espécimen 16	2,4887		
0,5	32	Deformación máxima espécimen 17	3,6619	3,3852	10
0,5	32	Deformación máxima espécimen 18	3,1085		



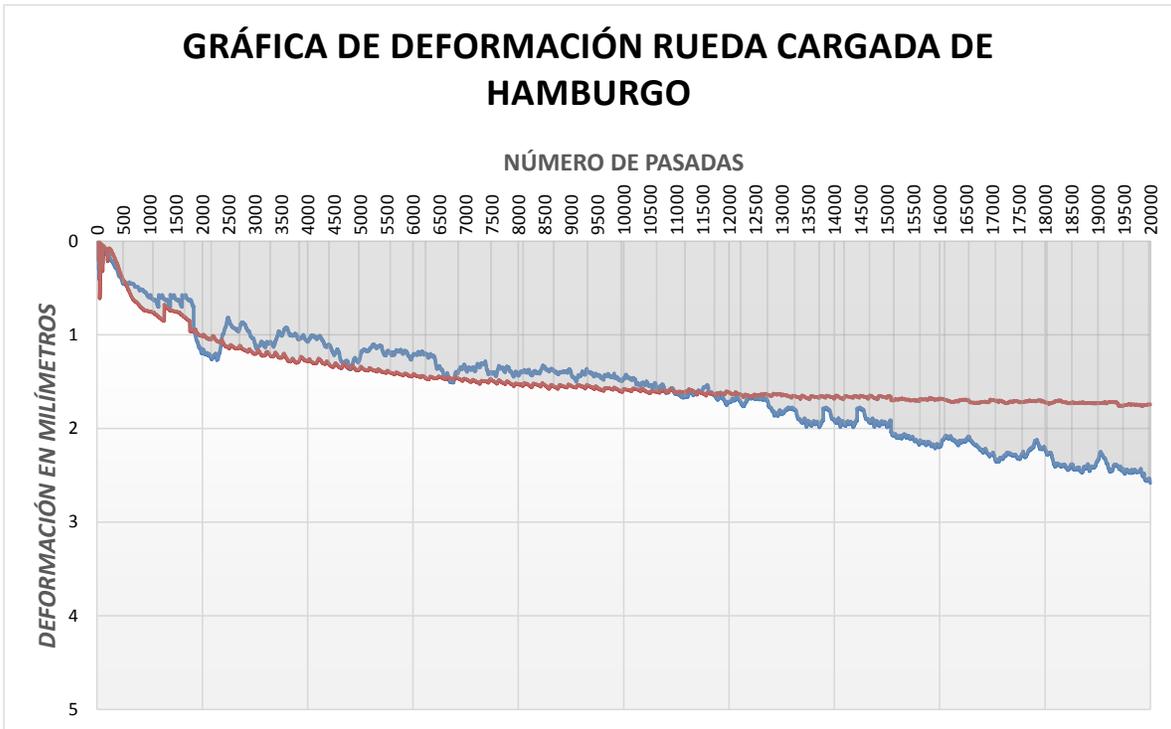
Gráfica 21 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 1,3 Azul= 2.



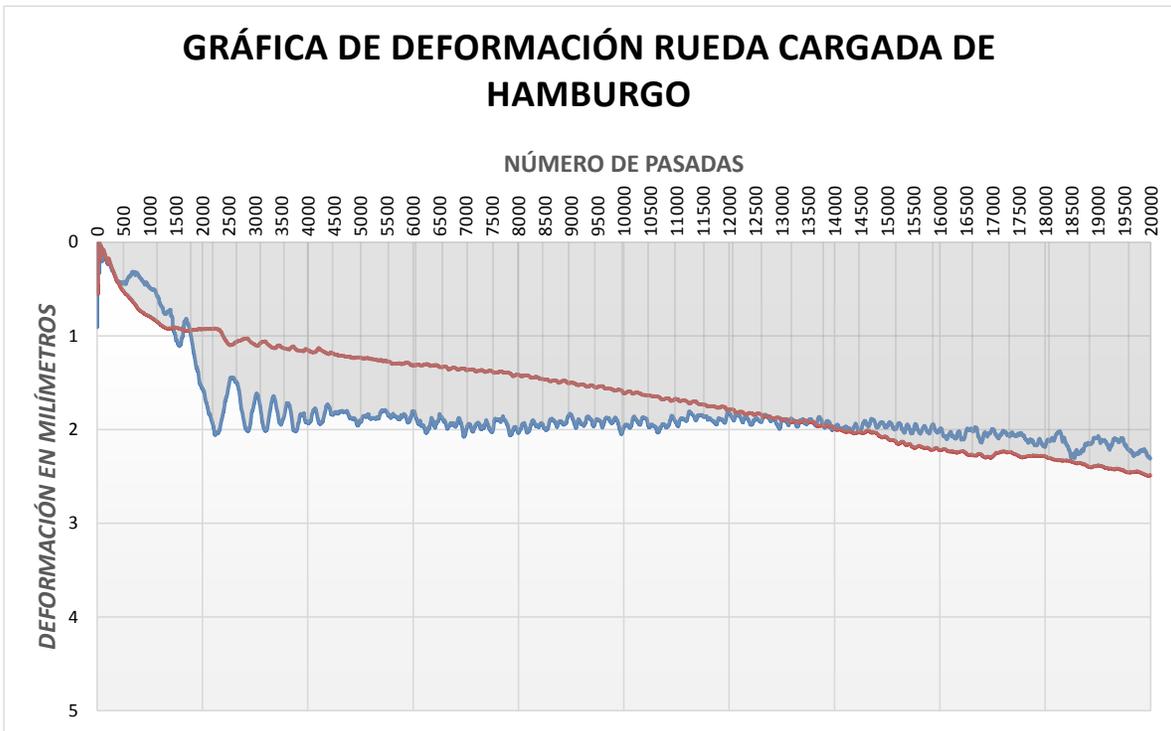
Gráfica 22 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,9 Azul= 2.



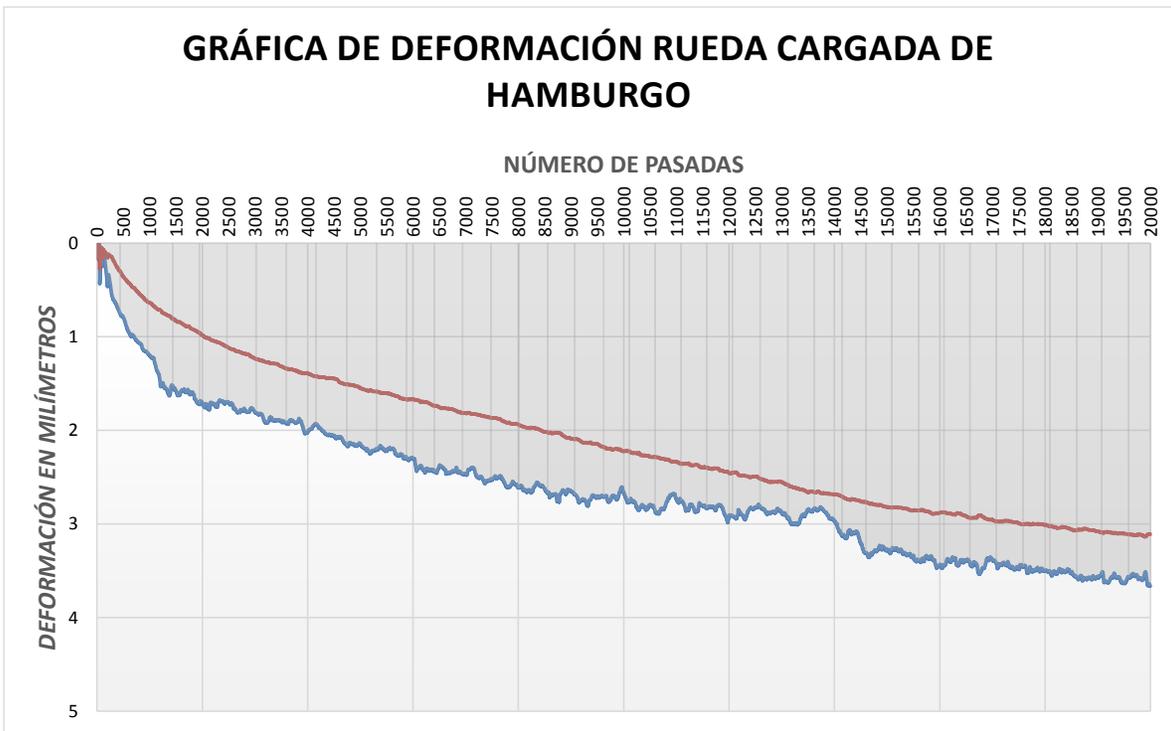
Gráfica 23 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,5 Azul= 2.



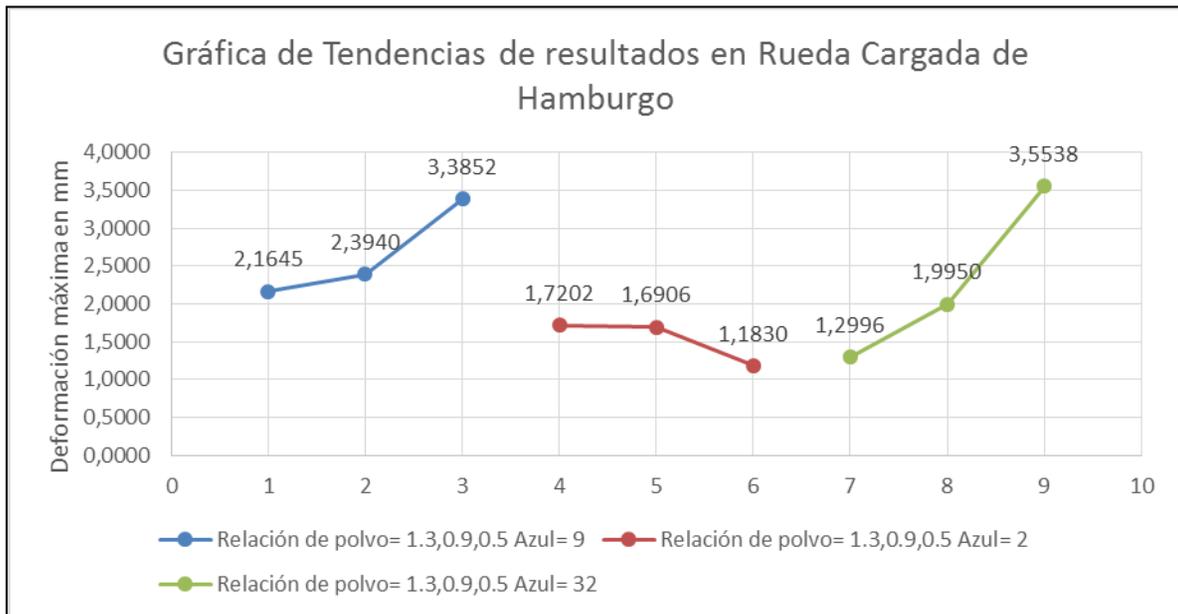
Gráfica 24 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 1,3 Azul= 32.



Gráfica 25 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,9 Azul= 32.



Gráfica 26 Resultado de ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo Relación de Polvo 0,5 Azul= 32.



Gráfica 27 Tendencia de resultados del ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo por efecto de las relaciones y calidad del Filler.

Una vez interpretados todos los resultados obtenidos de este ensaye se deduce que:

Las mezclas que contienen Filler de mejor calidad son las que mostraron mejores resultados ante este ensaye lo cual indica que su comportamiento mecánico es superior. Los resultados muestran que cuando se tiene un Filler de muy buena calidad como lo fue el empleado en la mezcla con un resultado de azul de metileno de 2 mg/g difiere de la de 9 mg/g ya que en este caso entre menos Filler contenía la mezcla, mejores resultados se obtuvieron.

Se corrobora además que el efecto de las relaciones de Filler no se cumple en este ensayo pues en ninguna de las 3 mezclas se obtuvo el comportamiento que se esperaba ante esta situación.

4.1.2.3 Módulos Dinámicos

Al igual que en el apartado 4.1.1.3 que corresponde a los resultados obtenidos del ensaye de módulos dinámicos evaluando el efecto de las relaciones de polvo, en el presente apartado se sigue la misma metodología de prueba, solo que la finalidad de este apartado es evaluar el efecto de la calidad del Filler tomando en cuenta las mezclas que contienen 3 relaciones de polvo y 3 tipos Filler. A continuación se muestran los resultados de los 6 pares restantes que corresponden a las mezclas que contienen relación de polvo de 0,9 y 0,5 además de Filler con resultado de azul de metileno de 2 mg/g y 32 mg/g respectivamente.

A continuación se muestran las tablas y gráficas de isotermas y curvas muestran que corresponden a los resultados obtenidos de este ensaye para cada una de las mezclas a evaluar.

Tabla 38 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.

<i>Relación de polvo = 1.3 Filler con azul de metileno= 2</i>				
Temperatura °C	F(Hz)	Δt	$(F*\Delta t)$	E* (MPA)
0	10	1828,05841	18280,5841	25683,7985
0	5	1828,05841	9140,29207	23066,1135
0	1	1828,05841	1828,05841	20182,688
0	0,5	1828,05841	914,029207	19168,673
0	0,1	1828,05841	182,805841	16119,8215
20	10	1	10	11564,74
20	5	1	5	10375,925
20	1	1	1	7349,14
20	0,5	1	0,5	6465,387
20	0,1	1	0,1	5073,912
40	10	0,00142783	0,01427835	3953,947
40	5	0,00142783	0,00713917	3448,969
40	1	0,00142783	0,00142783	2317,34
40	0,5	0,00142783	0,00071392	2022,201
40	0,1	0,00142783	0,00014278	1604,077

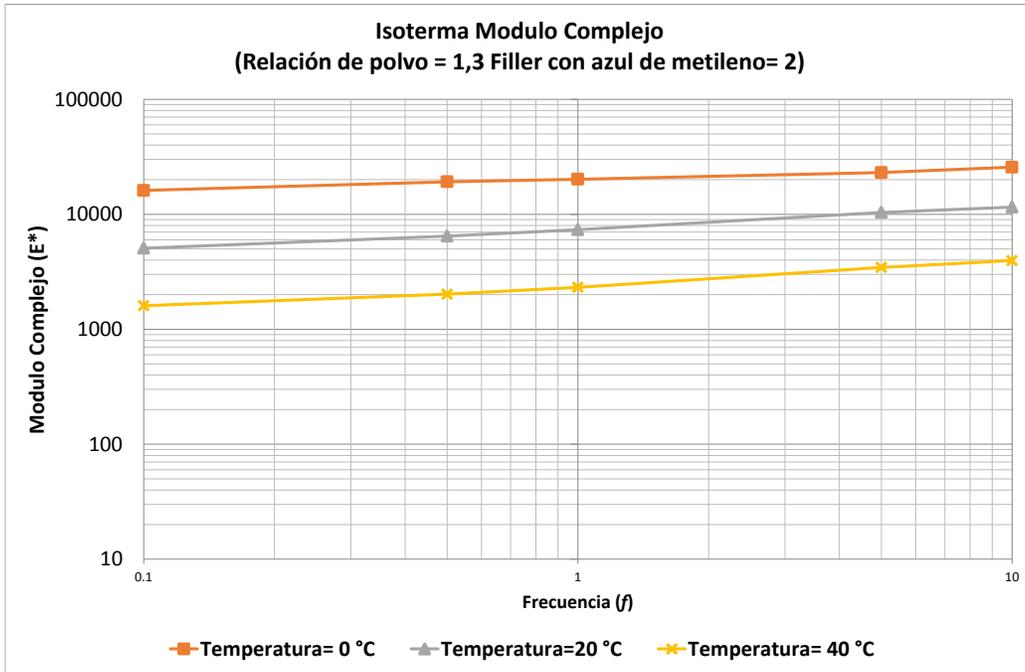
Donde:

F (Hz)= Frecuencia de prueba.

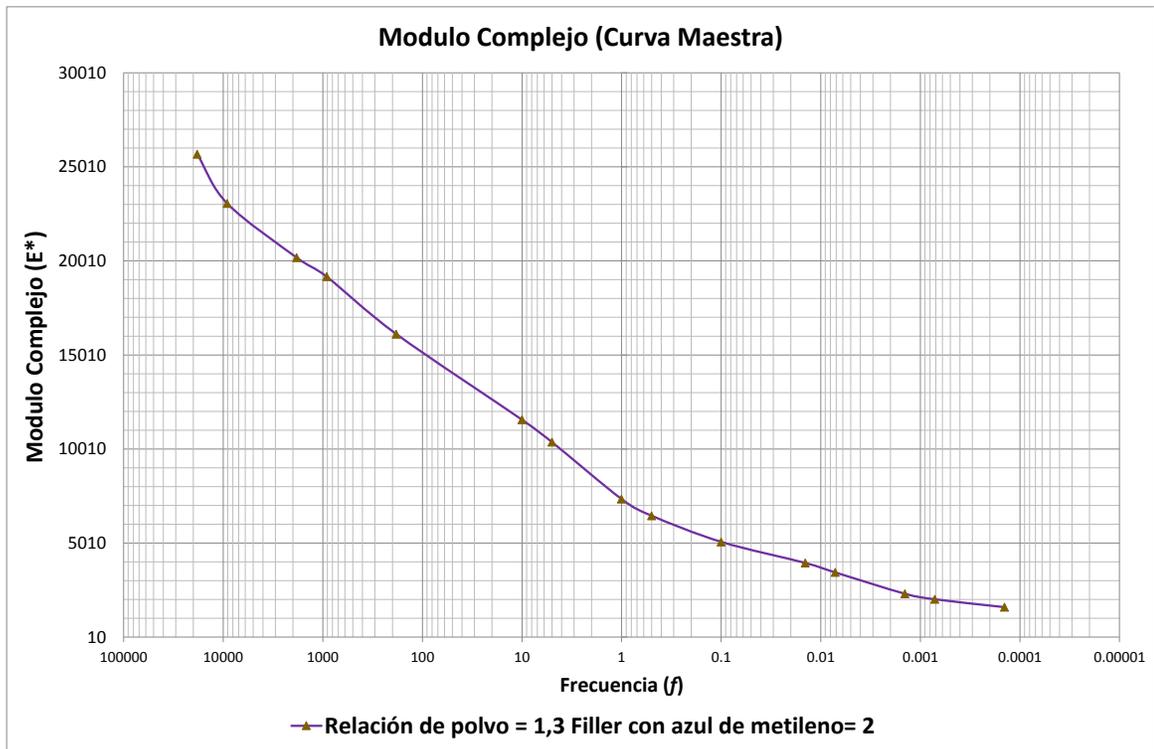
at= Resultado de la relación sigmoïdal de la temperatura deseada tomando como temperatura de referencia 20 °C.

At*at= Calculo necesario para la superposición del tiempo-temperatura del módulo dinámico.

E= Módulo Dinámico en mega pascales.



Gráfica 29 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.



Gráfica 28 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.

Tabla 39 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.

Relación de polvo = 0,9 Filler con azul de metileno= 2				
Temperatura °C	F(Hz)	Δt	(F*Δt)	E* (MPA)
0	10	1828,05841	18280,5841	28568,484
0	5	1828,05841	9140,29207	27708,516
0	1	1828,05841	1828,05841	20778,813
0	0,5	1828,05841	914,029207	18541,883
0	0,1	1828,05841	182,805841	17061,773
20	10	1	10	13031,638
20	5	1	5	12496,456
20	1	1	1	7628,042
20	0,5	1	0,5	7078,791
20	0,1	1	0,1	4748,239
40	10	0,00142783	0,01427835	4109,065
40	5	0,00142783	0,00713917	3504,158
40	1	0,00142783	0,00142783	2309,583
40	0,5	0,00142783	0,00071392	1994,295
40	0,1	0,00142783	0,00014278	1520,647

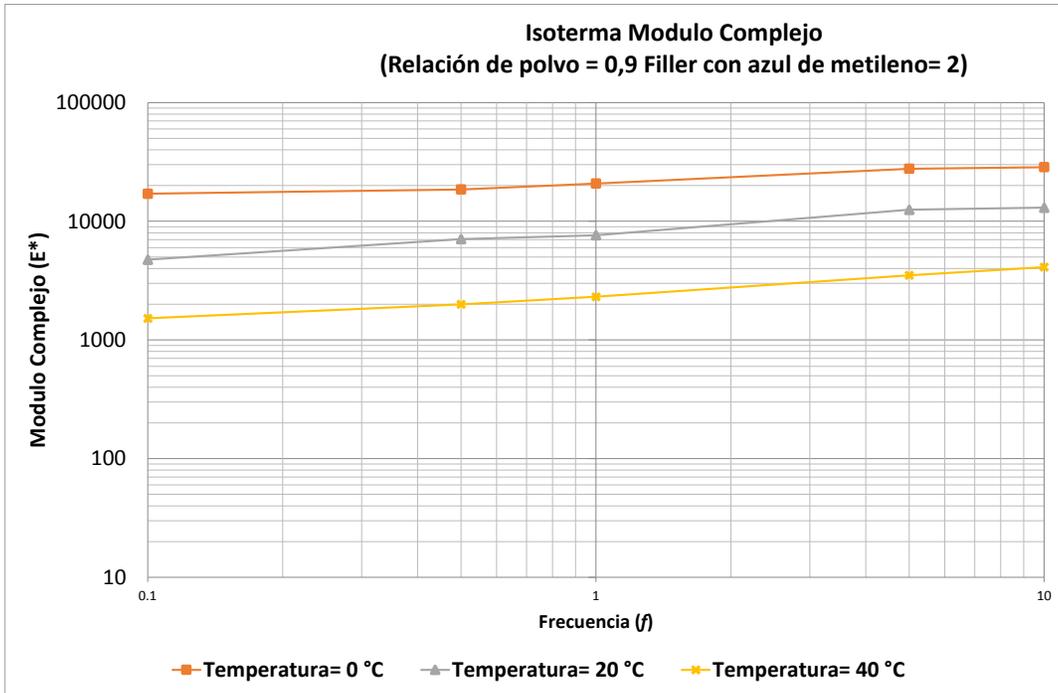
Donde:

F (Hz)= Frecuencia de prueba.

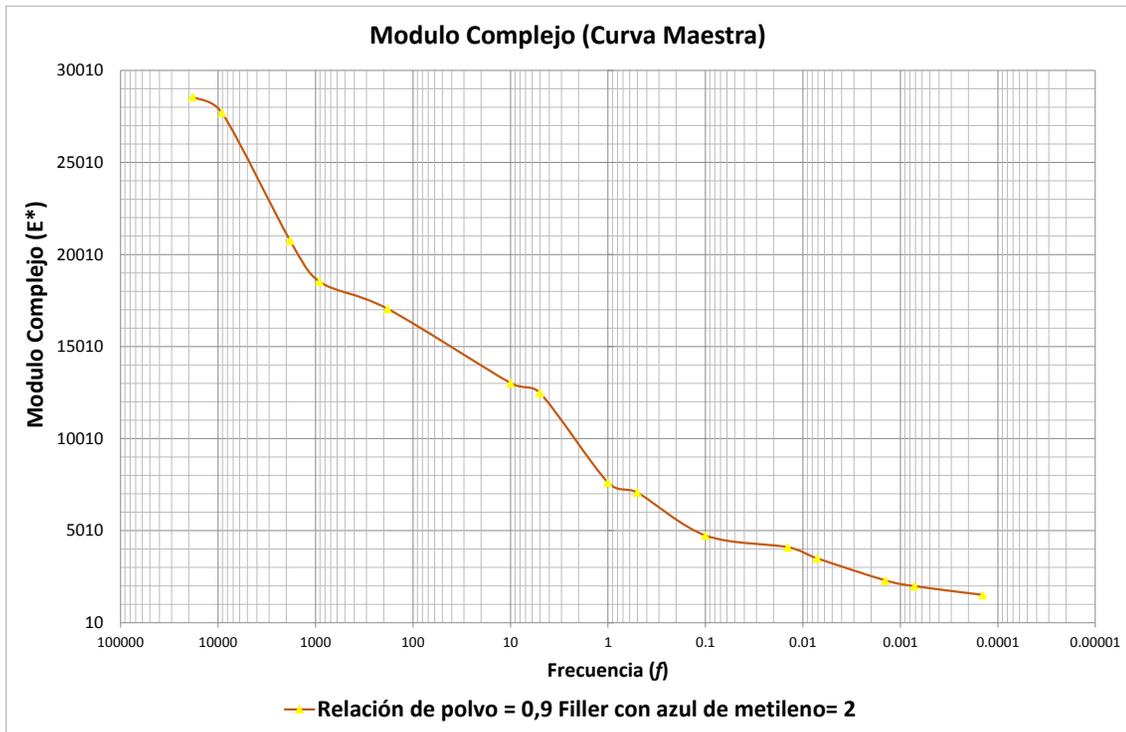
at= Resultado de la relación sigmoideal de la temperatura deseada tomando como temperatura de referencia 20 °C.

At*at= Calculo necesario para la superposición del tiempo-temperatura del módulo dinámico.

E= Módulo Dinámico en mega pascales.



Gráfica 31 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.



Gráfica 30 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.

Tabla 40 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.

<i>Relación de polvo = 0,5 Filler con azul de metileno= 2</i>				
Temperatura °C	F(Hz)	Δt	$(F*\Delta t)$	E (MPA)
0	10	1828,05841	18280,5841	26391,602
0	5	1828,05841	9140,29207	23563,084
0	1	1828,05841	1828,05841	19581,771
0	0,5	1828,05841	914,029207	17683,568
0	0,1	1828,05841	182,805841	13415,55
20	10	1	10	12198,5805
20	5	1	5	10487,816
20	1	1	1	7090,85
20	0,5	1	0,5	5748,2515
20	0,1	1	0,1	4384,4595
40	10	0,00142783	0,01427835	4030,324
40	5	0,00142783	0,00713917	3197,2479
40	1	0,00142783	0,00142783	2530,787
40	0,5	0,00142783	0,00071392	2209,595
40	0,1	0,00142783	0,00014278	1550,603

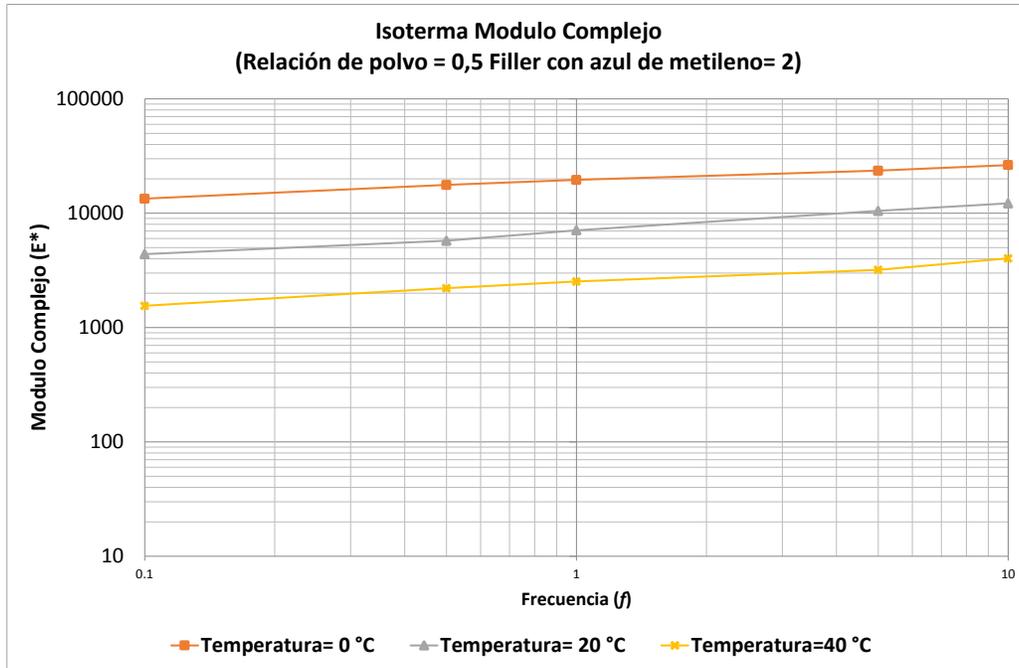
Donde:

F (Hz)= Frecuencia de prueba.

a_t = Resultado de la relación sigmoïdal de la temperatura deseada tomando como temperatura de referencia 20 °C.

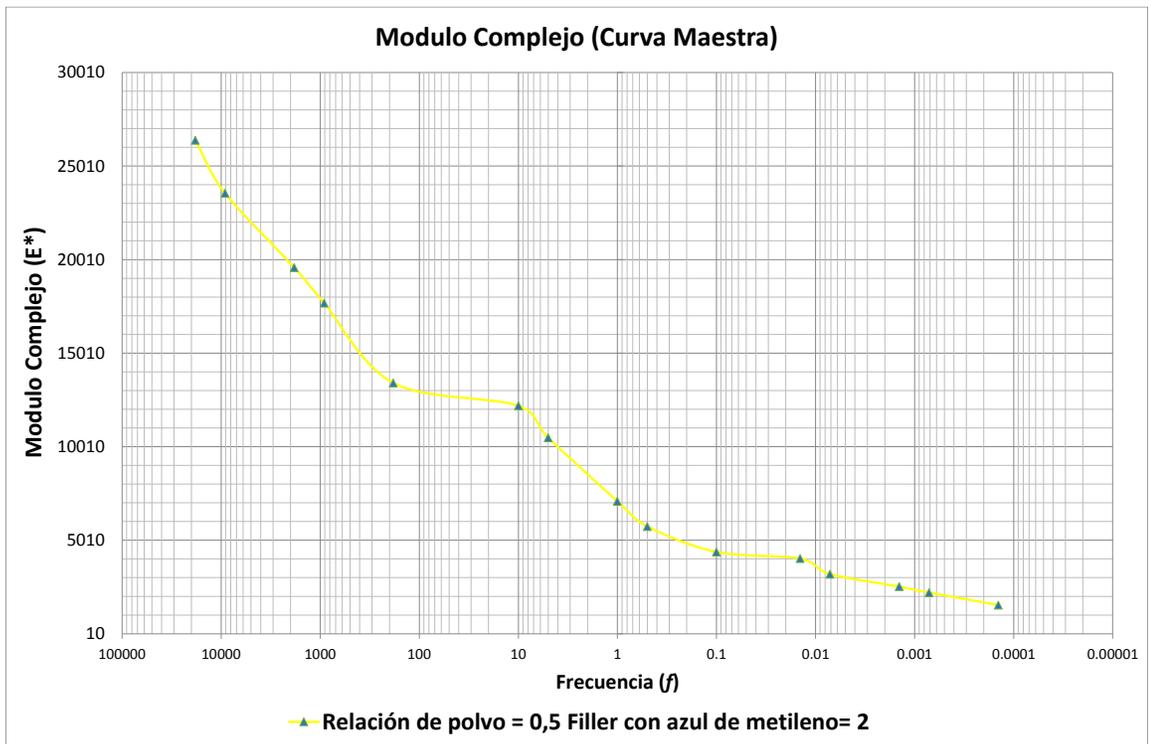
A_t*a_t = Calculo necesario para la superposición del tiempo-temperatura del módulo dinámico.

E= Módulo Dinámico en mega pascales.



Gráfica 32 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.

Tabla 41



Gráfica 33 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 2.

Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.

<i>Relación de polvo = 1.3 Filler con azul de metileno= 32</i>				
Temperatura °C	F(Hz)	Δt	$(F*\Delta t)$	E* (MPA)
0	10	1828,05841	18280,5841	22469,051
0	5	1828,05841	9140,29207	20234,934
0	1	1828,05841	1828,05841	16809,291
0	0,5	1828,05841	914,029207	15119,772
0	0,1	1828,05841	182,805841	11316,597
20	10	1	10	9727,667
20	5	1	5	8579,757
20	1	1	1	6330,822
20	0,5	1	0,5	5505,932
20	0,1	1	0,1	4067,321
40	10	0,00142783	0,01427835	3761,859
40	5	0,00142783	0,00713917	3052,018
40	1	0,00142783	0,00142783	1993,446
40	0,5	0,00142783	0,00071392	1672,867
40	0,1	0,00142783	0,00014278	1422,048

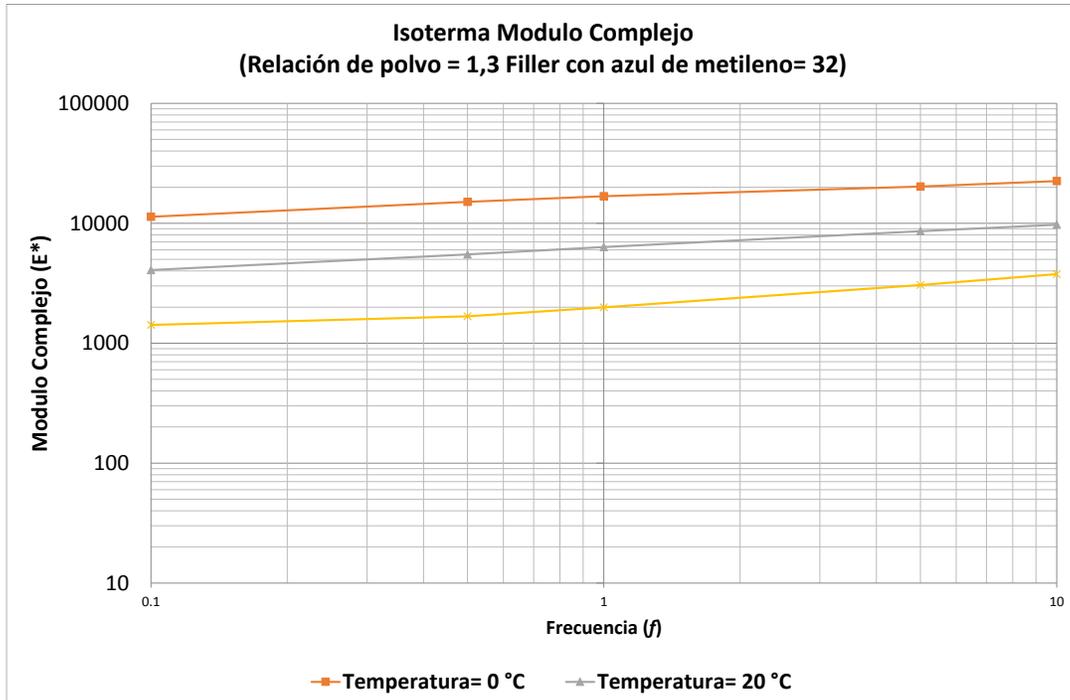
Donde:

F (Hz)= Frecuencia de prueba.

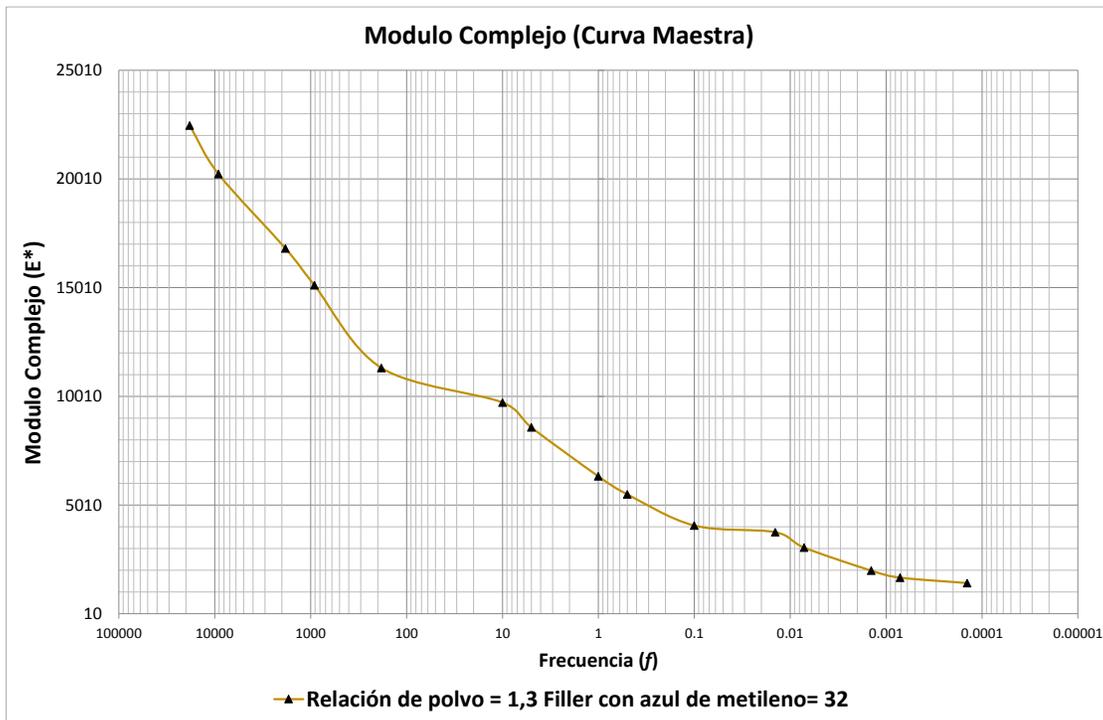
at= Resultado de la relación sigmoideal de la temperatura deseada tomando como temperatura de referencia 20 °C.

At*at= Calculo necesario para la superposición del tiempo-temperatura del módulo dinámico.

E= Módulo Dinámico en mega pascales.



Gráfica 35 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.



Gráfica 34 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=1,3 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.

Tabla 42 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.

<i>Relación de polvo = 0,9 Filler con azul de metileno= 32</i>				
Temperatura °C	F(Hz)	Δt	$(F*\Delta t)$	E* (MPa)
0	10	1828,05841	18280,5841	25170,842
0	5	1828,05841	9140,29207	23391,662
0	1	1828,05841	1828,05841	19583,416
0	0,5	1828,05841	914,029207	17970,5
0	0,1	1828,05841	182,805841	13890,087
20	10	1	10	11194,7335
20	5	1	5	9512,299
20	1	1	1	6753,795
20	0,5	1	0,5	5744,9425
20	0,1	1	0,1	4174,8155
40	10	0,00142783	0,01427835	3391,512
40	5	0,00142783	0,00713917	2814,078
40	1	0,00142783	0,00142783	1983,75
40	0,5	0,00142783	0,00071392	1587,578
40	0,1	0,00142783	0,00014278	1289,196

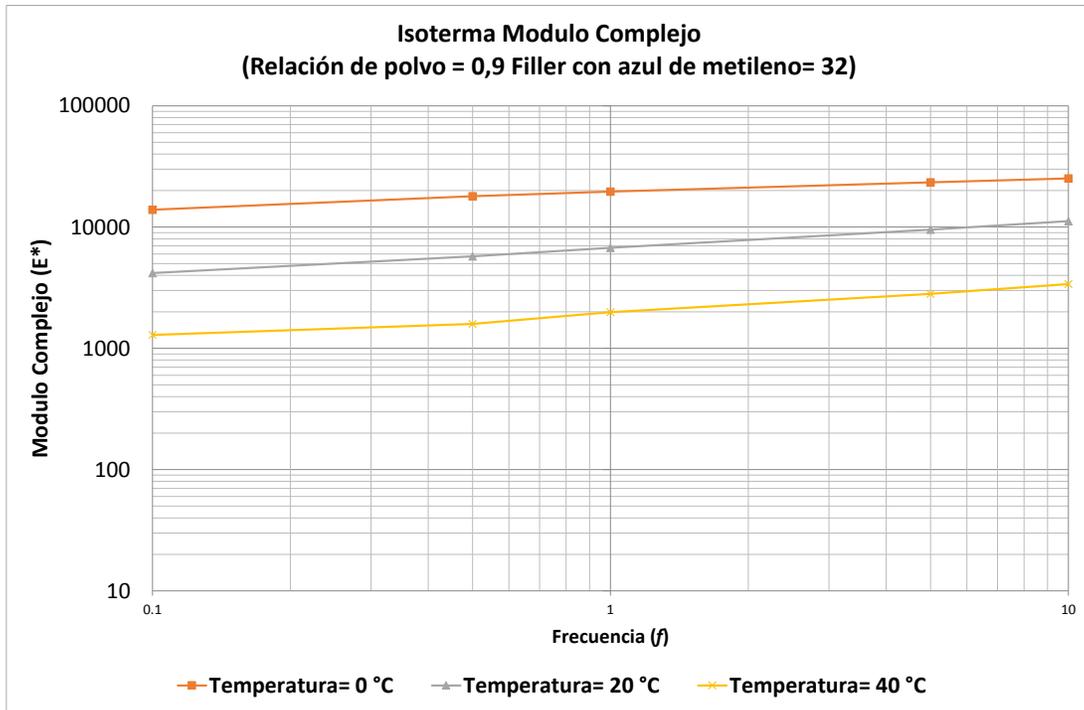
Donde:

F (Hz)= Frecuencia de prueba.

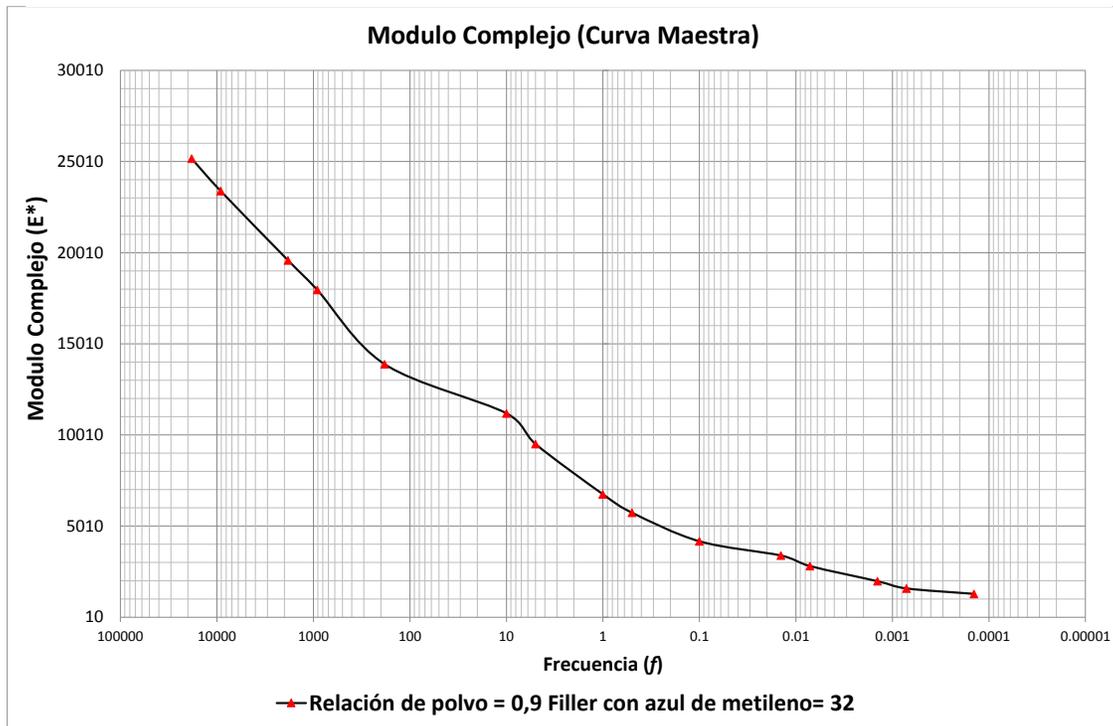
at= Resultado de la relación sigmoideal de la temperatura deseada tomando como temperatura de referencia 20 °C.

At*at= Calculo necesario para la superposición del tiempo-temperatura del módulo dinámico.

E= Módulo Dinámico en mega pascales.



Gráfica 37 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.



Gráfica 36 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,9 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.

Tabla 43 Resultados del ensaye de módulo dinámico correspondiente a la mezcla con relación de polvo= 0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.

<i>Relación de polvo = 0,5 Filler con azul de metileno= 32</i>				
Temperatura °C	F(Hz)	Δt	$(F*\Delta t)$	E* (MPA)
0	10	1828,05841	18280,5841	37493,551
0	5	1828,05841	9140,29207	34029,82
0	1	1828,05841	1828,05841	27933,393
0	0,5	1828,05841	914,029207	25318,273
0	0,1	1828,05841	182,805841	19836,883
20	10	1	10	19426,367
20	5	1	5	17135,41
20	1	1	1	12451,892
20	0,5	1	0,5	10873,78
20	0,1	1	0,1	8137,969
40	10	0,00142783	0,01427835	6761,759
40	5	0,00142783	0,00713917	5892,339
40	1	0,00142783	0,00142783	4325,787
40	0,5	0,00142783	0,00071392	3843,49
40	0,1	0,00142783	0,00014278	3272,318

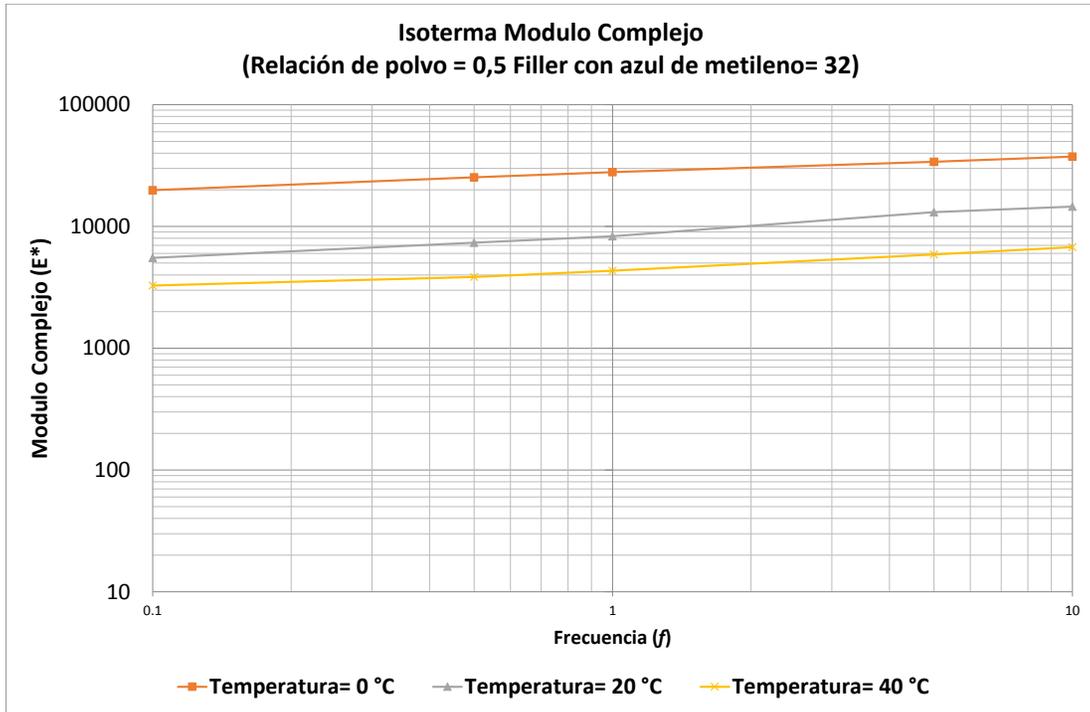
Donde:

F (Hz)= Frecuencia de prueba.

a_t = Resultado de la relación sigmoideal de la temperatura deseada tomando como temperatura de referencia 20 °C.

A_t*a_t = Calculo necesario para la superposición del tiempo-temperatura del módulo dinámico.

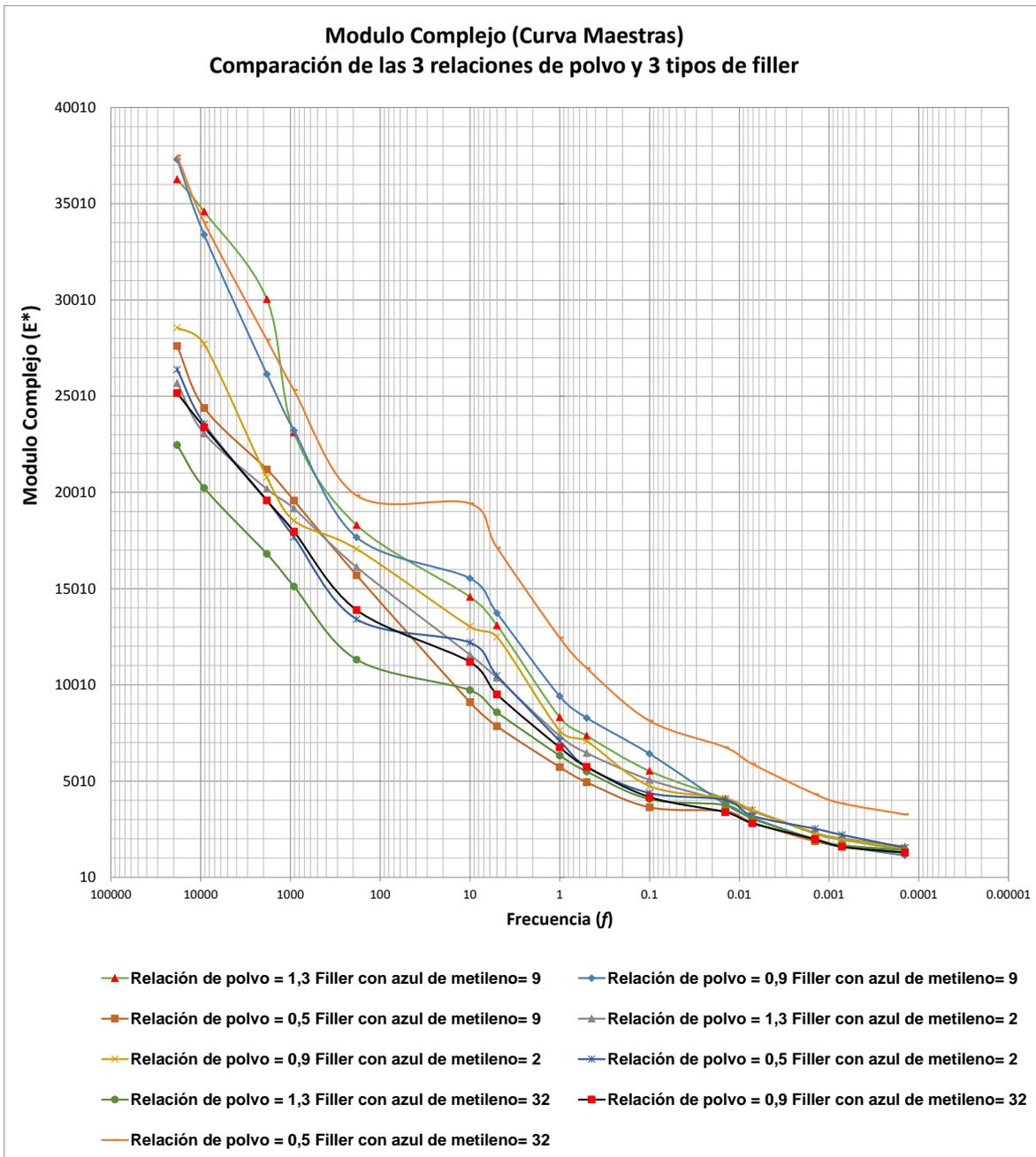
E= Módulo Dinámico en mega pascales.



Gráfica 39 Isoterma de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.



Gráfica 38 Curva Maestra de módulo complejo correspondiente a la mezcla con relación de polvo=0,5 y Filler con resultado de azul de metileno= 32.



Gráfica 40 Comparación de resultados entre curvas maestras referente al efecto del tipo de Filler y las relaciones de polvo.

En base a los resultados que se muestran en este apartado y con el apoyo de esta última gráfica 40, se pudo observar que se corroboran los resultados que se obtuvieron en el ensaye de TSR, ya que efectivamente se cumple el efecto de la relación de polvo para las mezclas que contienen un Filler con calidad de azul de metileno aceptable.

Además de corroborarse que la mezcla que contiene un Filler con calidad de azul de metileno muy malo no se cumple este efecto, ya que los resultados que se obtuvieron fue que entre menos Filler de mala calidad este contenido en la mezcla mejores resultados de sus propiedades mecánicas se tendrán, que en este caso se evalúa la resistencia ante la deformación y la capacidad de carga lo que se traduce en un mejor desempeño de la mezcla.

En cuanto al efecto del tipo de Filler no se cumple eficientemente, pues se obtuvieron resultados inesperados ya que al observar la gráfica 39 se identifica que las mezclas que contienen un Filler con calidad adecuada, se obtuvieron mejores resultados en las que contenían un Filler con calidad de azul de metileno de 9 mg/g que las de 2 mg/g y quedando muy abajo en los resultados la mezcla que contenía un Filler inadecuado con resultado de azul de metileno de 32 mg/g. Esto haciendo referencia con las mezclas que contienen una relación de polvo de 1,3 y 0,9. ya que la mezcla que contenía un Filler de mala de calidad con resultado de azul de metileno de 32 mg/g y una relación de polvo de 0,5 se obtuvo un resultado muy por encima de todos los demás.

V. CONCLUSIONES

Durante la realización de esta investigación se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

1.- Tanto la selección adecuada de los agregados pétreos, como respetar indicadores a cumplir para cada una de las pruebas de caracterización, es fundamental para elaborar una mezcla asfáltica que mediante la metodología SUPERPAVE sea adecuada, ya que aun estando en la fase de diseños volumétricos es posible observar, el cómo varían las propiedades volumétricas tan solo con modificar la granulometría a emplear en la mezcla y esto implica que su comportamiento mecánico varíe.

2.- Efectivamente al adicionar una adecuada dosificación de Filler se cumple de una mejor manera el cerrado de la mezcla, ya que como se pudo observar, aquellos diseños que tienen una relación de polvo que no entra en las especificaciones dictadas por SUPERPAVE, se encuentran en el límite o no cumplen con todas las propiedades volumétricas aunque el cálculo de asfalto óptimo a emplear en la mezcla arroje un % de vacíos del 4%.

3.- Si se cuenta con una relación de polvo muy por debajo del rango que dicta SUPERPAVE es necesario adicionar a la mezcla mayor cantidad de cemento asfáltico lo que significa mayores costos de producción.

4.- Las mezclas que estén dentro de la relación de polvo que indica SUPERPAVE muestran propiedades volumétricas más adecuadas.

5.- Como se pudo observar en los apartados que muestran la evaluación de la mezcla ante la susceptibilidad al daño provocado por humedad TSR y Módulos Dinámicos, se corrobora que efectivamente la mezcla que contenía Filler que corresponde a una mezcla con una relación de polvo que se encuentra dentro del rango que dicta SUPERPAVE, fue la mezcla que se desempeñó de mejor manera y que mostró mejores resultados por lo que su comportamiento mecánico es superior por sus propiedades mecánicas de resistencia a la humedad, carga y capacidad de deformación.

6.- En la evaluación de las mezclas ante la susceptibilidad a la humedad, al realizar la comparativa entre los diseños que se les adiciono Filler de distinta calidad, se concluye que entre más calidad tenga el Filler que se adicioné en la mezcla, mejor comportamiento mecánico tendrá y con ello se obtendrán buenos resultados de desempeño.

7.- Al evaluar la deformación permanente de las mezclas mediante el ensaye de Rueda Cargada de Hamburgo, los resultados muestran que conforme se disminuye la relación de polvo se obtienen mejores resultados esto hablando del efecto de las relaciones de polvo. Sin embargo al evaluar la mezcla mediante este ensaye y tomando a consideración la calidad del Filler, se observó que efectivamente las mezclas que contenían Filler de mejor calidad fueron las que obtuvieron mejor comportamiento mecánico pues son menos susceptibles a la deformación.

8.- En los resultados que se obtuvieron en el ensaye de los Módulos Dinámicos haciendo referencia a la evaluación de las mezclas por el efecto del tipo de Filler, estos difieren de los ensayes de TSR y Rueda Cargada de Hamburgo ya que no se cumplió dicho efecto, pues los resultados obtenidos muestran que el Filler que proviene directamente del agregado pétreo que se empleó en la mezcla asfáltica mostró mejores resultados ante este ensayo y posteriormente el Filler de procedencia industrial que fue un carbonato de calcio.

Sin embargo los resultados referentes a la mezcla que contenía un Filler muy malo que fue la combinación granito-tepetate efectivamente estuvieron muy por debajo por lo cual se puede llegar a la conclusión que el usar Filler de buena calidad en una mezcla asfáltica, ayuda a aumentar las propiedades mecánicas de la mezcla por lo que se considera descartar el uso de Fillers de mala calidad ya que la presente investigación muestra que en 2 de 3 ensayos se corrobora el efecto de las relaciones de polvo el cual indica que las mezclas que tengan una relación de polvo dentro del rango de SUPERPAVE sus propiedades mecánicas serán superiores.

9.- Sin duda los resultados obtenidos demuestran el beneficio de incorporar Filler de mejor calidad en la mezcla. Sin embargo habría que hacer mayor cantidad de estudios a la infinidad de materiales disponibles y combinaciones posibles para determinar qué tan benéfico o no, es emplearlo en la mezcla sin tomar por definitivo el resultado que la prueba de azul de metileno nos arroje.

VI. LITERATURA CITADA

Ahmed F, Bahía H, 2009. "Conceptual Phenomenological Model for Interaction of Asphalt Binders with Mineral Fillers". *AAPT* Vol. 78, pp. 679-720.

Ahmed F, Bahia H, 2011. *Effect of Mineral Filler Characteristics on Asphalt Mastic and Mixture Rutting Potential*. *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2208, pp 33-39.

Ahmed F, Wen, Stephenson L, Bahia H, 2008. "Effect of Mineral Filler on Damage Resistance Characteristics of Asphalt Binders". *AAPT* Vol. 77, pp. 885-908.

Atish N, Kamil K, Waleed Z, Krishna B, 2010. *Using Dynamic Modulus Test to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures*. *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2127, pp 29-35.

Bianchetto H, Miró R, Pérez- Jiménez F, 2007. "Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales. Primera parte: estudios en base al método UCL". *Revista Infraestructura Vial, Lanamme UCR, 2007* Publicación No. 17

Bianchetto H, Miró R, Pérez-Jiménez F, Martínez A, 2007. *Effect of calcareous fillers on Bituminous Mix Aging*. *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1998, pp 140-148.

Cominsky R, Leahy R, Harrigan E, 1994. "Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction, and Conditioning", SHRP-A408.

- Coree B, Hislop W, 1999. "The difficult Nature of Minimum VMA: A Historical Perspective". *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1661, pp 148-156.
- Curtis C, Ensley K, Epps J, 1993. "Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption", SHRP-A341.
- D'Angelo T, Bukowski J, Harman J, 1994. "SUPERPAVE Level 1 Mixture Design Workshop, Illinois, #94028", Federal Highway Administration, Office of Technology Applications, Demonstration Project No. 90.
- Ferreira C, Rodríguez J, 2005. "Utilización de diferentes tipos de Fillers en diseño de mezclas asfálticas a 4000 msnm". XIII Congreso Ibero Latino-Americano del Asfalto.
- Garnica P, Delgado H, Sandoval C, 2005. "Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas", IMT, Publicación Técnica No 271, Sanfandila, Qro, MÉXICO.
- Harrigan E, Leahy R, Youtcheff J, 1994. "The Superpave Mix Design System Manual of Specifications, Test Methods, and Practices", SHRP-A379.
- Higuera C, Naranjo G, Cetina J, 2011. "Determinación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica por correlaciones". *Revista Facultad de Ingeniería Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, Vol.20, pp 41-54.
- Huang B, Shu X, Chen X, 2007. Effects of mineral Fillers on hot-mix asphalt laboratory-measured properties. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 8, pp.1-9.

IMT-SCT, 2007/2008. Inventario Nacional de Infraestructura del Transporte.

Kennedy T, Huber G, Harrigan E, Cominsky R, Quintus H, Moulthrop J, 1994
“Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the
SHRP Asphalt Research Program”, SHRP-A410.

Leahy R, Harrigan E, Von-Quintus H, 1994. "Validation of Relationships Between
Specification Properties and Performance", Strategic Highway Research
program, SHRP-A409.

Leseur D, Little D, 1999. “EFFECT OF HYDRATED LIME ON THE REOLOGY,
FRACTURE AND AGING OF BITUMEN”. *Journal of the Transportation
Research Board*, Vol. 1661, pp 96-105.

Marín C, Guzmán M, 2007. “Modelación de una estructura de pavimento utilizando
los módulos dinámicos obtenidos en laboratorio aplicando las
metodologías Marshall y Superpave”. *Revista Ingenierías Universidad de
Medellín*, Vol. 6 pp. 53-63.

Martínez F, Angelone S, Tosticarelli J, 1985. Determinación del Módulo Dinámico
(Stiffness) de mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos de la Región
Litoral. III Congreso Ibero Latino-Americano del Asfalto.

Movila-Quesada D, Vega-Zamanillo A, Calzada-Pérez M, Castro-Fresno D, 2011.
*Evaluation of water effect on bituminous mastics with different contribution
Fillers and binders*. *Construction and Building Materials*, pp. 339-347.

Miró R, Martínez A, Pérez F, Bianchetto H, 2005. *EFFECT OF FILLER ON THE
AGING POTENTIAL OF ASPHALT MIXTURES*. *Journal of the
Transportation Research Board*, Vol. 1901, pp 10-17.

- Padilla A, 2004. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Tesina, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rowe G, Sharrock M, 2011. "ALTERNATE SHIFT FACTOR RELATIONSHIP FOR DESCRIBING THE TEMPERATURE DEPENDENCY OF THE VISCO-ELASTIC BEHAVIOUR OF ASPHALT MATERIALS". *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2207, pp 125-135.
- Reyes C, 2011. Estudio del comportamiento del mástico asfáltico con diferentes tipos de Filler de la región de Morelia, cal y cemento, mediante el método UCL. Tesis de Licenciatura, UMSNH.
- Sandoval I, 2009. Estudio del comportamiento reológico del mástico mediante reómetro de corte dinámico. XV Congreso Ibero Latino-Americano del Asfalto.
- SUPERPAVE, 1994. *BACKGROUND of SUPERPAVE ASPHALT MIXTURE DESIGN and ANALYSIS. 1er Ed* ASPHALT INSTITUTE, USA.
- The Asphalt Institute, 1993. "Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types", Manual Series no.2, 6th Ed.*
- Tunncliff D, 1953. Review of Minerall Fillers, *Journal AAPT* Vol. 314, pp. 118-150.
- Witczak M, 2005. "DEVELOPMENT OF A MASTER CURVE (E*) DATABASE FOR LIME MODIFIED ASPHALTIC MIXTURES".
http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/master-curve.pdf

VII. ANEXOS

Tabla A-1.- Secuencia de cálculo de propiedades de la mezcla asfáltica.

Fórmula de la propiedad volumétrica	Significado de las variables
<p>Gravedad específica neta, Gsb</p> $Gsb = \frac{P1 + P2 + \dots + PN}{P1 + P2 + \dots + PN G1 G2 GN}$	<p>Gsb = gravedad específica neta para el agregado total</p> <p>P1, P2, Pn = porcentajes individuales por masa de agregado</p> <p>G1, G2, Gn = gravedad específica neta individual del agregado</p>
<p>Gravedad específica efectiva, Gse</p> $Gse = \frac{Pmm + Pb}{Pmm + Pb Gmm Gb}$	<p>Gse = gravedad específica efectiva del agregado</p> <p>Gmm = gravedad específica teórica máxima, obtenida en laboratorio (ASTM D 2041, AASHTO T209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire)</p> <p>Pmm = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100</p> <p>P b = contenido de asfalto con el cual ASTM D 2041/AASHTO T 209 desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla</p> <p>Gb = gravedad específica del asfalto</p>
<p>Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.</p> <p>Gmm.</p> $Gmm = \frac{Pmm Ps + Pb}{Gse Gb}$	<p>Gmm = gravedad específica teórica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire)</p> <p>Pmm = porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100</p> <p>Ps = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla</p> <p>Pb = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla</p> <p>Gse = gravedad específica efectiva del agregado</p> <p>Gb = gravedad específica del asfalto</p>
$Gmb = \frac{Wa}{Wss - Ww}$	<p>Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 o D 2726).</p> <p>Wa = masa de la probeta en el aire</p>

	<p>WW = masa de la probeta en el agua (sin parafina)</p> <p>WSS = masa de la probeta saturada y superficialmente seca</p>
<p>Vacíos en el agregado mineral, VAM</p> $VAM = 100 - Gmb \times Ps \times Gsb$	<p>VAM = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)</p> <p>Gsb = gravedad específica neta del total de agregado</p> <p>Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 O D 2726/AASHTO T 166)</p> <p>Ps = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica</p>
<p>Vacíos en el agregado mineral, VAM. Si la composición de la mezcla es determinada como el porcentaje de la masa del agregado.</p> $VAM = 100 - Gmb \times 100 \times Gsb \times 100 + Ps$	<p>Pb = contenido de asfalto, porcentaje de la masa del agregado</p>
Fórmula de la propiedad volumétrica	Significado de las variables
<p>Vacíos de aire, Va</p> $Va = 1 - Gmb \times 100 \times Gmm$	<p>Va = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total</p> <p>Gmm = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica</p> <p>Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada</p>
<p>Vacíos llenados con asfalto, VFA</p> $VFA = VAM - Va \times 100 \times VAM$	<p>VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM</p> <p>VAM = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total</p> <p>Va = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total</p>
<p>Asfalto absorbido, Pba</p> $Pba = 100 \times Gse - Gsb \times G \times b \times G \times se \times Gsb$	<p>Pba = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado</p> <p>Gse = gravedad específica efectiva del agregado</p>

	<p>Gsb = gravedad específica neta del agregado</p> <p>Gb = gravedad específica del asfalto</p>
<p>Contenido de asfalto efectivo, Pbe</p> <p>$Pbe = Pb - Pba \times Ps \ 100$</p>	<p>Pbe = contenido de asfalto efectivo, porcentaje del total de la mezcla</p> <p>Pb = contenido de asfalto, porcentaje de la masa de la mezcla</p> <p>Pba = asfalto absorbido, porcentaje de la masa de la mezcla</p>