



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres Transporte Y Logística

Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica
 Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
 Maestría en Ingeniería De Vías Terrestres, Transporte Y Logística

Presenta:

Ing. Domingo Eduardo Campos Hernández

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Co-Dirigido por:

Dr. Horacio Delgado Alamilla

Dra. María de la Luz Pérez Rea
 Presidente

Dr. Horacio Delgado Alamilla
 Secretario

Dr. Omar Chávez Alegría
 Vocal

Dr. Saúl Obregón Biosca
 Suplente

Mtro. Juan Fernando Mendoza Sánchez
 Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
 Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
 Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
 Querétaro, Qro
 Fecha (Mayo, 2017)

RESUMEN

El reciente incremento de tránsito en intensidad y frecuencia sobre las vialidades del territorio Mexicano (INEGI, 2016), es producto del crecimiento de la población y de la expansión de industria en los últimos años, por lo que se requieren carreteras con mejores desempeños. La construcción de las mismas consume muchos recursos, tanto naturales como económicos. Una de las técnicas utilizadas a nivel mundial para reducir el consumo de estos recursos es la implementación del material reciclado de la carpeta asfáltica conocido también como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) por sus siglas en inglés. Por lo anterior, al utilizar los materiales reciclados de la estructura de un pavimento, se abre un amplio abanico de posibilidades y metodologías para su uso, los cuales van de acuerdo a la aplicación o diseño final del material recuperado donde éste puede ser utilizado ya sea en frío o en caliente, y a su vez realizar dicho proceso de reciclaje en planta o en sitio. Por tal razón, es posible reutilizar la capa de rodamiento, e incluso los materiales existentes en la estructura de pavimento.

En la presente investigación se muestra una técnica relativamente nueva en México para la estabilización de bases para pavimentos asfálticos, la que además de ser una técnica de reciclaje en frío, brinda la posibilidad de mejorar las propiedades de los materiales de los pavimentos, tal es el caso de reutilizar la carpeta asfáltica reciclada “RAP” como una base hidráulica estabilizada, reduciendo considerablemente los costos de suministro y acarreo de nuevos materiales, reutilizando los ya existentes una vez que han cumplido su vida útil.

En particular se presenta el proceso de elaboración de la espuma de asfalto a nivel laboratorio mediante el equipo WLB-10S. Este proceso depende principalmente de dos factores como son la temperatura del asfalto y el contenido de agua. Además, se encamina al diseño particular de la metodología Wirtgen para la estabilización de una base hidráulica con RAP utilizando asfalto espumado. Aunado a lo anterior se presentan la evaluación de los diferentes comportamientos mecánicos tales como la Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS, por sus siglas en inglés), Cohesión y Fricción al realizar diferentes variaciones de filler activos, contenidos asfálticos y variaciones granulométricas de la mezcla. Siendo que por último se expone una referencia a nivel nacional del valor de Modulo de Resiliencia en una base con RAP estabilizada mediante la técnica de asfalto espumado.

(Palabras Clave: Tránsito, Carretera, México, Estabilización, RAP, Asfalto Espumado, Pavimentos, Diseño, Filler, Granulometría, Resistencia a la Tracción Indirecta, Cohesión, Fricción, Módulo de Resiliencia)

SUMMARY

The recent increase of traffic in intensity and frequency on the roads of Mexico (INEGI, 2016) is a result of the population growth and the industry expansion in recent years, which means that roads with better performance are required. The construction of them consumes many resources, such as natural and economic. One of worldwide techniques used to reduce the consumption of these resources is the implementation of recycling asphalt pavement also known as Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Therefore, when using the recycled materials of a pavement structure, a wide range of possibilities and methodologies for its use are opened, which according to the application or final design of the recovered material, where it can be used either in cold or hot, and in turn perform such recycling process in plant or on site. For this reason, it is possible to reuse the bearing layer, and even existing materials in the pavement structure.

The present research shows a relatively new technique in Mexico for bitumen stabilization materials (BSM), which besides being a cold recycling technique, offers the possibility to improve the properties of pavement materials, such is the case of reusing the "RAP" as a stabilized hydraulic base, considerably reducing the costs of supplying and hauling new materials, reusing existing ones once they have reached their useful life.

In particular, the foamed bitumen (FB) design process at laboratory level is presented below using the WLB-10S equipment, which depends mainly on two factors such as the asphalt temperature and the water content. In addition, it is directed to the particular design of the Wirtgen methodology for the stabilization of a hydraulic base with RAP using foamed bitumen.

In addition to the above, different mechanical behavior such as Indirect Tensile Strength (ITS), Cohesion and Friction angle are presented when performing different active filler variations, asphaltic contents and granulometric variations of the mixture. Finally, a first national reference of the Resilient Modulus value is exposed for a Foamed Asphalt Stabilization using a Hydraulic Base with RAP material in México.

(Keywords: Traffic, roads, México, Stabilization, RAP, Foamed Bitumen, pavement, design, active filler, granulometric, Indirect Tensile Strength, Cohesion, Friction Angle, Resilient Modulus)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primera e infinitamente a Dios por haberme dado la gracia de vida, así como la capacidad de crecimiento, fortaleza física y espiritual. Por ponerme en el lugar adecuado, con las personas adecuadas y a su debido tiempo. Por darme la oportunidad de crecer en todos los aspectos, por sus bendiciones. Por brindarme una maravillosa familia, a los mejores padres y a los mejores compañeros de vida.

A mis amados padres:

Domingo Campos León y María de Jesús Hernández Núñez, por todo el amor, apoyo y soporte incondicional que me han brindado no sólo en la presente etapa de estudio, sino a lo largo de todos estos años de vida.

A mis compañeros de Vida:

Mis hermanos Christian Alejandro, Yazmín Lizeth y José Carlos Campos Hernández, por ser mi soporte, mi motor y mi aliento a lo largo de esta etapa.

A mis abuelos:

Domingo Campos Campos (†) & Manuela León Cabrera por su crianza y bendiciones a lo largo de mi vida.

José Trinidad Hernández (†) & Blanca Julia Hernández Núñez por estar siempre presente en sus oraciones.

A mis amigos:

A todos y cada uno de ustedes que fueron y son partícipes del presente proyecto de vida que hoy culmina.

A mi familia:

A todos mis familiares, a los que nos acompañan de manera física y no física en este momento, a mis tíos, primos, abuelos y bisabuelos con los que tengo la gracia de sentir su amor, cariño y apoyo.

A mis profesores:

A cada uno de ustedes que además de impartir clases, transmitieron sus conocimientos y experiencias laborales, las cuales complementan las visiones y horizontes de crecimiento personal en el presente viaje denominado vida.

Generación MIVT 2015-1 -2016:

A todos mis compañeros de la M.I.V.T. que más que un solo vínculo de compañerismo, establecimos una buena amistad a lo largo de la presente etapa. Agradezco su apoyo, consejos, tiempo y retroalimentación que se requería tanto en clase como en horas de estudio, así como fuera de ellas. Considero que establecimos un grupo unido del cual me hago partícipe; Loyola, rafiqui, chaparrito, mikey, chema, Mérida, Ovidio.

Instituto Mexicano del Transporte:

Al Dr. Paul Garnica Anguas, gracias por permitirme realizar el vínculo con el Instituto Mexicano del Transporte; a mi mentor Dr. Horacio Delgado Alamilla por transmitirme sus conocimientos y orientarme a llevar una línea de investigación innovadora. A todo su personal que, de forma directa o indirectamente facilitaron hacia conmigo sus atenciones, respeto, tiempo y conocimiento.

Sinodales:

Dra. María de la Luz Pérez Rea, Dr. Horacio Delgado Alamilla, Dr. Omar Chávez Alegría, M.C. Juan Fernando Mendoza Sánchez, Dr. Saúl Obregón Biosca, por hacer crecer la presente investigación.

En general, a todas aquellas personas que estuvieron involucradas en la presenta etapa de estudio, comenzando desde mi llegada a la ciudad de Querétaro, hasta el momento en el cual culminó dicho estudio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que se me brindó durante el estudio del posgrado.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE GENERAL.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA USO DE RAP	6
2.2 ASFALTO ESPUMADO	9
2.3 PARTICULARIDADES DEL ASFALTO ESPUMADO.....	11
2.4 COMPORTAMIENTO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO (BSM) 15	
2.5 MÓDULOS DE RESILIENCIA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	19
2.5.1 <i>MODELOS CONSTITUTIVOS PARA MÓDULOS DE RESILIENCIA</i>	23
2.5.2 <i>MODELO DE PREDICCIÓN DE MÓDULOS DE RESILIENCIA BASADOS EN UNA ECUACIÓN CONSTITUTIVA.</i>	25
2.5.3 <i>MÓDULOS DE RESILIENCIA EN BASES ESTABILIZADAS.</i>	26
2.6 HIPÓTESIS, OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN	28
2.6.1 <i>HIPÓTESIS</i>	28
2.6.2 <i>OBJETIVO GENERAL</i>	28
2.6.3 <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	28
2.6.4 <i>JUSTIFICACIÓN</i>	28
3. METODOLOGÍA	31
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	34
3.1.1 <i>MATERIAL ASFÁLTICO</i>	34
3.1.1.1 GRADO PG Y RESULTADOS.....	34
3.1.2 <i>MATERIAL PÉTREO Y RAP</i>	36
3.1.2.1 PLASTICIDAD DE LOS MATERIALES	37
3.1.2.2 GRANULOMETRÍA	38
3.2 GRANULOMETRÍA DE DISEÑO	39
3.2.1 <i>DENSIDAD SECA MÁXIMA</i>	41
3.2.2 <i>PROPORCIÓN REPRESENTATIVA</i>	41
3.3 PROPIEDADES ESPUMANTES DEL ASFALTO	42
3.3.1 <i>DETERMINACIÓN DE ESPUMADO ÓPTIMO</i>	46
3.4 DISEÑO DE LA MEZCLA DE MATERIALES (FÓRMULA DE TRABAJO).....	46
3.4.1 <i>NIVEL I.- FILLER ACTIVO</i>	48
3.4.1.1 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES/DENSIFICACIÓN.....	49
3.4.1.2 PROCEDIMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO.....	52
3.4.1.3 SELECCIÓN DE FILLER ACTIVO	55
3.4.2 <i>NIVEL II.- CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO</i>	56
3.4.2.1 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES/DENSIFICACIÓN.....	56
3.4.2.2 PROCEDIMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO.....	57

3.4.2.3	SELECCIÓN ÓPTIMA DE ASFALTO ESPUMADO	58
3.4.3	NIVEL III.- DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS	59
3.4.3.1	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES/DENSIFICACIÓN.....	61
3.4.3.2	PROCEDIMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO	64
3.5	INDICADOR PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS	66
3.5.1	INSTRUMENTACIÓN DE LA PRUEBA DE MÓDULO DE RESILIENCIA	66
3.5.2	ENSAYO DE LA PRUEBA MÓDULO DE RESILIENTE	68
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	73
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ASFÁLTICO	73
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO Y RAP	74
4.3	GRANULOMETRÍA DE DISEÑO	76
4.3.1	DOSIFICACIÓN DE MATERIALES	77
4.3.2	DENSIDAD SECA MÁXIMA	78
4.3.3	PROPORCIÓN REPRESENTATIVA	79
4.4	PROPIEDADES ESPUMANTES DEL ASFALTO	81
4.5	DISEÑO NIVEL I	84
4.6	DISEÑO NIVEL II	87
4.7	DISEÑO NIVEL III	90
5.	INDICADOR PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS, MÓDULO DE RESILIENCIA	92
6.	INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO EN EL DESEMPEÑO DE LA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO	96
6.1	INFLUENCIA DEL FILLER ACTIVO	96
6.1.1	DISCUSIÓN PARTICULAR	101
6.2	INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE FILLER ACTIVO EN EL DESEMPEÑO MECÁNICO NIVEL III	102
6.2.1	DISCUSIÓN PARTICULAR	104
6.3	INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE FILLER ACTIVO Y CANTIDAD DE ASFALTO ESPUMADO EN EL DESEMPEÑO MECÁNICO DE MÓDULO DE RESILIENCIA	106
6.3.1	DISCUSIÓN PARTICULAR	109
7.	CONCLUSIÓN GENERAL	110
8.	LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA	112
9.	BIBLIOGRAFÍA	113
10.	ANEXOS	119
10.1	ANEXO A - GRANULOMETRÍAS, PVSM, LÍMITES DE CONSISTENCIA	119
10.2	ANEXO B - POSIBLES COMBINACIONES DE LOS MATERIALES	124
10.3	ANEXO C - CÁLCULO PARA PESO DE BACHEOS NIVEL I Y II	128
10.4	ANEXO D - CÁLCULO PARA PESO DE BACHEOS NIVEL III	130
10.5	ANEXO E - CÁLCULO DE MATERIAL PONDERADO PARA BACHEO	131
10.6	ANEXO F- PRUEBA TRIAXIAL PARA 2.4% A.E. Y 1% CAL	132
10.7	ANEXO G- PRUEBA TRIAXIAL PARA 2.4% A.E. Y 1% CEMENTO	138
10.8	ANEXO H- PRUEBA TRIAXIAL PARA 2.4% A.E. Y 1% SIN FILLER	144
10.9	ANEXO I- DIMENSIONES Y HUMEDADES DE PROBETAS TRIAXIALES CONTINUAS.	150
10.10	ANEXO J- RESULTADO DE LA PRUEBA DE MÓDULO DE RESILIENCIA	151
10.11	ANEXO K- MANUAL PRÁCTICO PARA EL DISEÑO DE ASFALTO ESPUMADO	156

10.12 ANEXO L- ESPECIFICACIÓN PARTICULAR PARA EL DISEÑO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO, PROCESADO EN SITIO..... 190

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Crecimiento Vehicular en el Territorio Mexicano. Elaboración Propia. Fuente: (INEGI, 2016)	2
Figura 2.1 AEI del reciclado. Fuente: Elaboración propia con base en Aschenbrener (2013).	5
Figura 2.2 Heavy Vehicle Simulator propiedad del Instituto Mexicano del Transporte.	8
Figura 2.3 Cámara de Expansión para asfalto espumado (Ovalle, 2015).	9
Figura 2.4 Material Granular (a) No Unido, (b) Unión Continua (c) Unión Discontinua. Fuente: Wirtgen (2012).....	10
Figura 2.5 Comparación de una probeta de Base Estabilizada con Asfalto Espumado (a) vs Mezcla Asfáltica (b).....	10
Figura 2.6 Relación de Expansión y vida media. Fuente: Jenkins (2000).....	11
Figura 2.7 Decaimiento de espuma en función del tiempo (Izq.), Influencia del contenido de agua en la relación de Expansión (Der.). Fuente: Hailesilassie <i>et al.</i> (2016).....	12
Figura 2.8 Propiedades cortantes de los materiales estabilizados con Asfalto Espumado. Fuente: Wirtgen (2016).....	17
Figura 2.9 Rehabilitación de 1 Milla-1 Carril de Autopista a 3” de profundidad. (Shatec, 2013).	17
Figura 2.10 Reciclado en Frío en Planta con Asfalto Espumado con el Equipo KMA-220. Fuente: Wirtgen (2015).....	18
Figura 2.11 Respuesta del espécimen a un ciclo de carga-descarga. Fuente: Buchanan (2007)	20
Figura 2.12 Definición de Módulo de Resiliencia. Fuente: Garnica <i>et al.</i> (2000)	20
Figura 2.13 Tiempo de pulsación para el esfuerzo vertical con carga senoidal y triangular (Barksdale, 1971)	21
Figura 4.1 Obras Realizadas con Asfalto Espumado en México (Ovalle, 2015).....	30
Figura 5.1 Elementos Fundamentales para el Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado.	31
Figura 5.2 Comportamiento de los materiales en un pavimento. Elaboración propia con fuente Asphalt Academy (2009).....	32
Figura 5.3 Diagrama de Flujo Para Diseño de Base Estabilizada con Asfalto Espumado. Elaboración propia con fuente Wirtgen (2012).	33
Figura 5.4 Propuesta del Diseño para una Base Estabilizada con Asfalto Espumado aplicable a México. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 5.5 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos grado PG. Fuente: N-CMT-4-05-004/05	35
Figura 5.6 Diagrama de Flujo para Materiales Pétreos.....	37
Figura 5.7 Elaboración de la Norma (M-MMP-1-07/07, 2007).	37
Figura 5.8 Reducción de Muestras de Material RAP.....	38
Figura 5.9 Tamices y Mallas para el ensayo Granulométrico.	39
Figura 5.10 Límites Granulométricos para bases espumadas. Fuente: Wirtgen (2012)....	39
Figura 5.11 Molde para variante tipo "D"	41
Figura 5.12 Equipo de Laboratorio Wirtgen WLB-10S.	43

Figura 5.13	Diagrama de Flujo de análisis para el Material Asfáltico.	43
Figura 5.14	Recipiente y varilla estandarizada para Medición de Expansión de asfalto espumado.	44
Figura 5.15	Medición de Propiedades Espumantes del Asfalto Espumado.	44
Figura 5.16	Ajuste del Fluxómetro en el equipo WLB-30S.....	45
Figura 5.17	Propuesta de los diferentes Niveles de Diseño para una Base Estabilizada con Asfalto Espumado en México.	48
Figura 5.18	Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de Especímenes Nivel I.	49
Figura 5.19	Equipo Mezclador de Doble Eje Wirtgen WLM-30.....	50
Figura 5.20	Compactador Giratorio SERVOPAC. Propiedad del IMT.	51
Figura 5.21	Especímenes Nivel I Compactados Mediante el Compactador Giratorio.	52
Figura 5.22	Especímenes ITS _{SECO}	53
Figura 5.23	Especímenes ITS _{SATURADO}	53
Figura 5.24	Mediciones de especímenes para ITS.	54
Figura 5.25	Ensayo de pruebas ITS.....	54
Figura 5.26	Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de Especímenes Nivel II.	56
Figura 5.27	Proceso de Acondicionamiento ITS _{EQUILIBRIO}	58
Figura 5.28	Proceso de Acondicionamiento ITS _{EQUI-SAT}	58
Figura 5.29	Principio de una prueba triaxial. Fuente: Mulusa (2009).	59
Figura 5.30	Gráfica Mohr-Coulomb de pruebas triaxiales monotónicas. Fuente: Jenkins (2008).	60
Figura 5.31	Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de Especímenes Nivel III.	61
Figura 5.32	Características del Molde para elaboración de especímenes. Fuente: NCHRP Project 1-28A (2004).....	62
Figura 5.33	Molde para elaboración de especímenes.....	62
Figura 5.34	Compactación, Enrasado y desacoplamiento del molde.....	63
Figura 5.35	Pesado de espécimen.	64
Figura 5.36	Proceso de curado de los especímenes.	65
Figura 5.37	Colocación de la Membrana de Látex en el espécimen triaxial.....	65
Figura 5.38	Regulación de la presión de confinamiento en la membrana.	65
Figura 5.39	Montaje e Inicialización de la Prueba triaxial.....	66
Figura 5.40	Equipo de Laboratorio para Módulo de Resiliente.....	67
Figura 5.41	Esquema de los componentes de la cámara triaxial. Fuente: NCHRP Project 1-28A (2004)	68
Figura 5.42	Colocación de Probeta sobre la piedra porosa.	70
Figura 5.43	Colocación de Membrana de látex.	70
Figura 5.44	Colocación de cámara de acrílico.....	71
Figura 5.45	Ensamblaje final sobre el marco de carga.	71
Figura 5.46	Interfaz de ejecución de prueba.....	72
Figura 5.47	Especímenes ensayados para obtención de M_R	72
Figura 6.1	Curvas Granulométricas de los cuatro materiales analizados.	76
Figura 6.2	Mezclas del nuevo material dosificado	77
Figura 6.3	Curvas Granulométricas Finales.....	78

Figura 6.4 Peso Volumétrico Seco Máximo para Mezcla II.	79
Figura 6.5 Propiedades Espumantes a 160°. Elaboración Propia.	81
Figura 6.6 Propiedades Espumantes a 170°C. Elaboración Propia.....	81
Figura 6.7 Propiedades Espumantes a 180°C. Elaboración Propia.....	82
Figura 6.8 Valor TSR para selección de Filler de la Mezcla II.	85
Figura 6.9 Contenido óptimo de Asfalto con 1% de Cal.	88
Figura 6.10 Cohesión y Fricción para 2.4% de Asfalto espumado y 1% de Cal.	90
Figura 7.1 Ensayo MR para Mezcla II con 2.4% de Asfalto Espumado y 1% de Cal.....	92
Figura 7.2 Módulo de Resiliencia para una base estabilizada con 2.4% de A.E. y 1% de Cal.....	93
Figura 7.3 Comparativa de M_R de la Mezcla II estabilizada con 2.4% AE y 1% Cal vs una Base hidráulica tradicional.	94
Figura 8.1 Contenido Óptimo de Asfalto con 1% de Cemento.	97
Figura 8.2 Contenido Óptimo de Asfalto Sin Filler Activo.	98
Figura 8.3 Influencia del Contenido de Asfalto Espumado en los valores ITS. Elaboración Propia.	99
Figura 8.4 Influencia del filler activo en los valores ITS. Elaboración propia.....	100
Figura 8.5 Cohesión y Fricción para 2.4% de Asfalto espumado y 1% de Cemento.	102
Figura 8.6 Cohesión y Fricción para 2.4% de Asfalto espumado sin filler activo.....	103
Figura 8.7 Influencia del filler activo en los parámetros de Cohesión y Fricción para 2.4% de Asfalto Espumado.....	104
Figura 8.8 Efecto del Filler en el M_R con 2.4% de Asfalto Espumado.	106
Figura 8.9 Efecto del Asfalto Espumado en el M_R con 1% de Cal.	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Proyectos ejecutados con Asfalto Espumado por CONOCAL en México. Fuente: Fernández & Blanco (2015)	8
Tabla 2.2 Influencia del tamaño de cubeta y temperatura sobre la Relación de Expansión y Vida Media de asfalto espumado. Fuente: Lesueur et al. (2004).....	13
Tabla 2.3 Evolución de las propiedades de los asfaltos antes y después de espumar. Fuente: Lesueur et al. (2004)	14
Tabla 5.1 Ajustes de grado PG en el territorio Mexicano	35
Tabla 5.2 Determinación de pre-tratamiento con Filler. Fuente: Wirtgen (2012).....	38
Tabla 5.3 Valores límite para curvas granulométricas. Fuente: Wirtgen (2012).....	40
Tabla 5.4 Elaboración de proporción representativa. Fuente: Wirtgen (2012)	42
Tabla 5.5 Límites mínimos para asfalto espumado. Fuente: Wirtgen (2012).....	46
Tabla 5.6 Estimación Inicial de Asfalto Espumado. Fuente Wirtgen (2012).....	49
Tabla 5.7 Características de los especímenes Nivel I. Fuente: Wirtgen (2012)	51
Tabla 5.8 Procedimiento de acondicionamiento para ITS Nivel I. Fuente: Wirtgen (2012)	52
Tabla 5.9 Características Mínimas de aceptación para los especímenes Nivel I.....	55
Tabla 5.10 Características de los especímenes Nivel II. Fuente: Wirtgen (2012).....	57
Tabla 5.11 Procedimiento de Curado para ITS Nivel II. Fuente: Wirtgen (2012)	57
Tabla 5.12 Parámetros mínimos de Diseño Nivel II. Fuente: Wirtgen (2012).....	59
Tabla 5.13 Características de los especímenes según su nivel de diseño. Fuente: Wirtgen (2012)	61
Tabla 5.14 Procedimiento de Curado para ITS Nivel III. Fuente: Wirtgen (2012)	64
Tabla 5.15 Parámetros mínimos de diseño para el Nivel III. Fuente: Wirtgen (2012)	66
Tabla 5.16 Secuencia de ensayo para una Base Granular. Fuente: NCHRP (2004)	69
Tabla 6.1 Resultados de Calidad del material asfáltico analizado (Grado PG).	73
Tabla 6.2 Grado PG del Asfalto Analizado.	74
Tabla 6.3 Resultados Plásticos de los Materiales Analizados.....	74
Tabla 6.4 Análisis Granulométrico del porcentaje que pasa de los materiales utilizados..	75
Tabla 6.5 Material requerido en proporción representativa para elaboración de Nivel II de la Mezcla II.	79
Tabla 6.6 Material requerido en proporción representativa para bacheo de 23Kg de Mezcla II.....	80
Tabla 6.7 Propiedades espumantes del asfalto a diferentes temperaturas. Fuente: Elaboración Propia.....	82
Tabla 6.8 Comparativa de valores TSR para selección de Filler Activo.	85
Tabla 6.9 Optimización de Asfalto espumado con 1% de Cal.....	87
Tabla 6.10 Valores de Cohesión y Fricción para la Mezcla II.....	91
Tabla 8.1 Optimización de Asfalto espumado con 1% de Cemento.....	96
Tabla 8.2 Optimización de Asfalto espumado Sin Filler Activo.	97
Tabla 8.3 Elaboración de los diferentes tipos de especímenes variando filler activo.....	106
Tabla 8.4 Elaboración de los diferentes tipos de especímenes variando el contenido de asfalto espumado.	108

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	21
Ecuación 2	23
Ecuación 3	24
Ecuación 4	24
Ecuación 5	24
Ecuación 6	25
Ecuación 7	25
Ecuación 8	26
Ecuación 9	53
Ecuación 10	55
Ecuación 11	55
Ecuación 12	59
Ecuación 13	63
Ecuación 14	93

1. INTRODUCCIÓN

El análisis del desempeño de los materiales utilizados para el diseño pavimentos, ha partido desde conceptos sumamente básicos como lo son relaciones volumétricas, caracterización granulométrica y propiedades índice, llegando hasta los más complejos como predecir el comportamiento reológico de asfaltos y mezclas asfálticas. Sin embargo, hoy en día las metodologías de diseño comienzan a incursionar en analizar con detalle las cargas actuantes sobre las mismas, así como las diferentes influencias que podrían llegar a suscitarse en la estructura como la humedad y diferenciales térmicos.

Además es importante señalar que para cada diseño de pavimentos en particular, se tiene como objetivo predecir el comportamiento y/o desempeño que específicamente cada uno de los materiales utilizados tendrá durante la puesta en marcha de la estructura de pavimento. Razón por la cual, varios investigadores a lo largo del tiempo no sólo han realizado el análisis y caracterización de los materiales existentes en su estado natural; Sino que han conllevado a la mejora de materiales tanto granulares como no granulares con el propósito de potencializar su desempeño y de esta manera puedan ser utilizados como materiales estructurales en un diseño de pavimentos.

Por otra parte, el incremento de la población en México, según la base de datos de INEGI (2016), véase Figura 1.1; Así como la expansión territorial lleva de la mano a la creación de nuevas carreteras que conecten las diferentes localidades; llevando así a que los sectores industriales demanden un mayor número de viajes, y por consiguiente se requieran mejores vías de comunicación tales como carreteras, autopistas y vialidades de altas especificaciones; las cuales además de otorgar una mayor seguridad, permitan reducir los costos de operación y simultáneamente disminuir los tiempos de recorrido. Para lo anterior es necesario que los materiales utilizados en la estructura de pavimentos sean los adecuados para el tránsito esperado durante su vida útil.

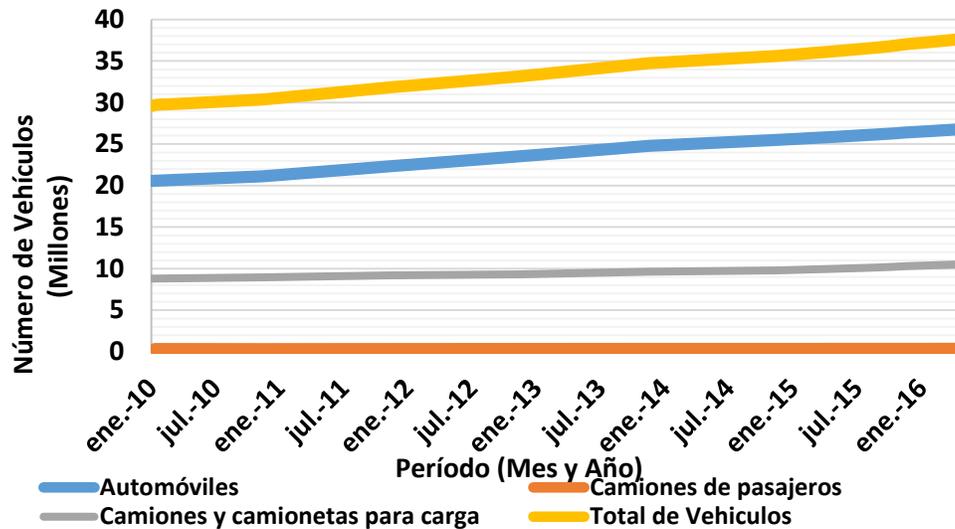


Figura 1.1 Crecimiento Vehicular en el Territorio Mexicano. Elaboración Propia. Fuente: (INEGI, 2016)

Sin embargo para poder satisfacer las necesidades de construcción de estas vialidades se requieren consumir muchos recursos, principalmente hablando de los materiales que conforman las capas estructurales del pavimento, como son la base y la carpeta asfáltica, ya que requieren principalmente de una inversión económica debido a su explotación, así como una afectación debido a la reducción de los recursos naturales del planeta, esto sin contar los diferentes tipos de emisiones por su explotación y transporte, además de un sinnúmero de incalculables tiempos de gestión y logística. Por esta razón, es importante mencionar que una de las tantas técnicas y metodologías utilizadas a nivel mundial para mitigar el consumo de los materiales que componen la base hidráulica y carpeta asfáltica, es la implementación del producto reciclado de la carpeta asfáltica conocido también como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) por sus siglas en inglés. Aunado a esto, el Departamento de Investigación del Transporte de los Estados Unidos de América, conocido como USDOT por sus siglas en inglés menciona que el RAP es todo material de pavimento removido y/o reprocesado que contenga asfalto y agregados (Chesner, Collins, & MacKay, 1998).

Dentro de las diferentes técnicas utilizadas a nivel internacional para la implementación del RAP, se dividen principalmente con respecto a su temperatura de reciclaje (reciclaje en frío, mezclas recicladas en tibio o en caliente). Dentro de las técnicas

existentes del reciclaje en frío es posible utilizar el material RAP mediante la estabilización con asfalto espumado. Esta tecnología permite reutilizar el material RAP existente ya sea en sitio o en planta disminuyendo principalmente los costos energéticos y emisiones al medio ambiente al ser una estabilización en frío, así como reducir la cantidad de nuevo material pétreo al utilizar el material existente sobre la viabilidad, además es posible acotar los tiempos de ejecución de obras debido a que es un proceso rápido en comparación de otras metodologías.

Es importante mencionar que, la tecnología del asfalto espumado ha cobrado auge en países Europeos, principalmente al reducir la cantidad de asfalto requerida para estabilizar y potencializar los materiales existentes para la construcción de las carreteras, además de los ahorros energéticos y económicos mencionados con anterioridad. Sin embargo, aun cuando el diseño para la implementación de la misma se encuentra estipulado en un manual de diseño, existe la incertidumbre de si los parámetros establecidos son los adecuados para aceptar o descartar el diseño realizado, más aún al proponer un material altamente variable como lo es el RAP.

Dentro del diseño de una estabilización con Asfalto Espumado, por un lado, se encuentra el análisis y aceptación del asfalto a utilizar, así como la aceptación de la espuma de asfalto obtenida, mientras que por otro lado es importante señalar que la carpeta asfáltica es variable, razón por la cual la granulometría del RAP estará en función de la misma, esto sin considerar que el equipo de fresado utilizado, así como de la cantidad y estado de las puntas que cuenta el tambor de fresado así como las RPM del mismo, además de la velocidad de avance del equipo, propiciarán a una dispersión o variación de la homogeneidad del RAP. Razón por la cual se pretende conocer el comportamiento que el asfalto espumado otorga a los diferentes materiales, en especial al utilizar el RAP, así como el desempeño mecánico que puede alcanzar la mezcla al variar el contenido de asfalto, filler activo, entre otros; Siendo así posible corroborar los valores de referencia propuestos en la literatura, además de conocer a detalle el procedimiento de Diseño, y en última instancia conocer valores los cuales permitan evaluar si el material es apto o no para la implementación en la estructura de pavimento, y predecir así el comportamiento del mismo en su vida útil.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA Y MARCO TEÓRICO

Dentro de la historia del reciclaje, es importante mencionar que reciclar el pavimento no es algo novedoso, debido a que existen indicios del reciclaje de pavimento asfáltico cerca del año 1900 (Izaks, Haritonovs, & Zaumanis, 2015). De la misma manera hacia los años de 1970, durante la crisis petrolera (Newcomb, Brown, & Epps, 2007), acaeció la necesidad de reciclar los pavimentos asfálticos debido a los altos costos del petróleo, sin embargo en ese entonces existía poca experiencia del diseño de pavimentos reciclados y su tecnología. Tampoco existían procedimientos constructivos aptos para su reaprovechamiento, ya que prácticamente las mezclas recicladas se consideraban solo experimentales o desconocidas.

Es por ello que, al implementar el uso del material RAP es posible reutilizar la capa de rodamiento, e incluso los materiales existentes en la estructura de pavimento, lo que representa: economía en el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos en servicio. Por ende se reducen los acarrees, costos por explotación de bancos de materiales y recursos naturales. Lo cual concuerda con lo mencionado por Newcomb, Brown, & Epps (2007) donde señala que los dos factores principales que influyen a utilizar el RAP son los ahorros económicos y beneficios ambientales.

Con base en lo anterior, dicha alternativa de reciclaje comienza a incursionarse con mayor frecuencia en diferentes países del mundo, e incluso, ha alcanzado promoverse en gran medida por la *European Asphalt Pavement Association* (EAPA, 2016). En donde el hecho de implementar materiales reciclados, ha sido una de las tantas cuestiones ecológicas para concientizar a través de los últimos años. De la misma manera la Federal Highways Administration de los EE.UU. (Aschenbrener, 2013) describe en su conferencia que el reciclaje de pavimento propicia a una mejora Ambiental-Económica-Ingenieril (AEI) tal lo muestra la Figura 2.1. Es decir 3E's Environmental, Economic, Engineering por sus siglas en inglés.

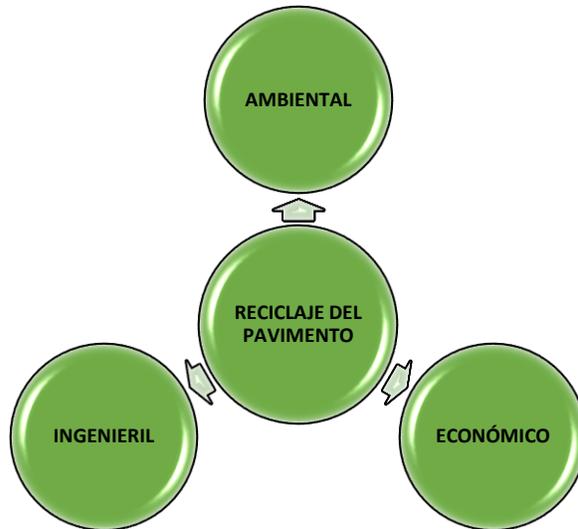


Figura 2.1 AEI del reciclado. Fuente: *Elaboración propia con base en Aschenbrener (2013).*

Además cabe señalar que al utilizar los materiales reciclados de la estructura de pavimentos de los pavimentos existentes, se abre un amplio abanico de posibilidades para su uso. Los cuales, van de acuerdo a la aplicación o diseño final del material recuperado; estos a su vez pueden ser clasificados de acuerdo a su temperatura , es decir pueden ser reciclados en frio o en caliente, y a su vez realizar dicho proceso de reciclaje en planta o en sitio.

De tal modo que es posible añadir un cierto porcentaje de RAP para producir una nueva Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA), Hot Mix Asphalt por sus siglas en inglés, considerando la posibilidad de utilizar un cemento asfáltico más blando o añadiendo aditivos rejuvenecedores, los cuales permitan compensar la rigidez actual del RAP. Al efectuar reciclados en caliente, es posible utilizar el pavimento envejecido o fallado mediante un tratamiento de calor, lo anterior, puede ser reciclado en una planta de asfalto o en sitio utilizando equipos diseñados para dicho propósito, los cuales permiten reutilizar la mezcla asfáltica adicionando regularmente un agente rejuvenecedor, para posteriormente ser extendido y compactado.

Mientras que por otro lado Stimilli, Ferrotti, Graziani, & Canestrari (2013) mencionan que durante las últimas dos décadas el reciclado en frio ha aumentado como una de las técnicas rentables para reducir la huella de carbono en las carreteras, debido a que el

reciclaje en frío utilizando estabilización con asfalto ofrece una solución eficiente y económica para la rehabilitación de las vialidades.

De la misma manera el material RAP puede ser utilizado por si sólo o en combinación de material estructural recuperado como es la base hidráulica, esto con el propósito de obtener una base hidráulica estabilizada mejorada añadiendo una cantidad específica de asfalto, filler (conocido también como active filler y traducido al español como relleno activo) o algún otro aditivo adicional. Tal es el caso de la implementación de la tecnología de asfalto espumado ya sea en planta o en sitio, es un proceso de bajo costo en comparación del reciclado en caliente (HMA), principalmente por el hecho de que no requiere de altas temperaturas para reprocesar los materiales, conjuntamente es amigable con el medio ambiente, genera un ahorro económico tanto de agregados como de los ligantes a utilizar, además de que permite mantener las distancias de visibilidad, así como los perfiles y alineaciones geométricos. Por consiguiente se conservan las alturas de gálibos en los Pasos Inferiores Vehiculares (PIV) así como de los Pasos Superiores Vehiculares (PSV).

2.1 IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA USO DE RAP

La Recuperación Profunda (FDR) ó Full-Depth Reclamation (por sus siglas en inglés) es una técnica de reciclaje en la cual toda la carpeta asfáltica existente y la totalidad o una porción de la capa inferior de los materiales pétreos, son procesados para producir una base bien compactada tal lo menciona Aurstad & Hoff (2002). La cual ha sido propuesta como una alternativa viable en la construcción de carreteras, tal lo menciona Fleming (1998), en la cual el material y los costos de transporte se pueden ver reducidos, debido a que el reciclaje descarta la necesidad de eliminar el material viejo, y transportar el nuevo material requerido. Así también la mezcla de RAP junto con el agregado triturado producto de la FDR tiene propiedades ingenieriles potenciales que exceden la calidad en comparación de un material de base granular virgen (Lee & Davis , 1998).

En la definición que realiza Rafaelli (2004) para la estabilización de una base con asfalto espumado, menciona que es un proceso de reciclaje de la vialidad, en donde todo

el pavimento y cierto espesor de material por debajo de éste son triturados, posteriormente dicho producto es tratado con asfalto espumado produciendo así una base estabilizada.

Tal es el caso de los pavimentos en Hong-Kong, He & Wong (2006), donde se requiere importar asfalto del extranjero. No obstante, anualmente en dicho país se fresan aproximadamente 200,000 toneladas de mezcla asfáltica de las carreteras, las cuales pueden ser aprovechadas en la construcción y/o rehabilitación de las mismas.

Así también Chan, Lane, Kazmierowski, Raymond, & Lee (2009), hacen referencia a los beneficios que puede proveer el reciclado en frío in-situ con la tecnología de asfalto espumado en comparación del fresado tradicional y re-colocado de las mezclas asfálticas en caliente, por lo que dichos autores mencionan que es posible lograr: Optimizar el uso de los recursos naturales, reducir el consumo de energía, reducir las emisiones de gases efecto invernadero, limitar la contaminación, mejorar la salud y la prevención de riesgos, además de garantiza un alto nivel de comodidad y seguridad al usuario.

El reciclado en frío in-situ con la tecnología de asfalto espumado provee numerosas ventajas en comparación con el reciclado en frío in-situ utilizando emulsiones o cualquier otro tipo de agente de reciclaje, principalmente por el hecho de utilizar asfalto espumado como agente estabilizador. Por lo cual es posible abrir dicha capa estabilizada al tráfico 60-90 minutos después de haber completado la compactación, además de expandir las temporadas de construcción incluso en climas lluviosos, ya que una de las bondades del reciclado mediante la tecnología de asfalto espumado tiene una sensibilidad a la humedad relativamente baja (Shatec, 2013).

No menos importante es señalar que el primer estudio realizado a gran escala fue llevado a cabo en Sudáfrica hacia el año 2000, en el cual se utilizó un Simulador de Vehículos Pesados ó Heavy Vehicle Simulator, HVS por sus siglas en inglés (véase la Figura 2.2), sobre una estabilización de pavimentos reciclados en combinación de asfalto espumado.



Figura 2.2 Heavy Vehicle Simulator propiedad del Instituto Mexicano del Transporte.

Fue a partir dicha investigación que se elaboró una Guía Técnica Provisional Sudafricana (TG2) para el diseño y uso de materiales tratados con asfalto espumado y emulsiones asfálticas (Asphalt Academy, 2009), la cual posteriormente ha sido complementada y actualizada, tal es el caso del manual de diseño Wirtgen (2012). Siendo que a partir del primero de los anteriores, se comienza a incursionar en México con dicha tecnología (Tabla 2.1). Sin embargo, hasta el momento no se cuenta con la Normativa que regule dicho diseño y/o procedimiento constructivo.

Tabla 2.1 Proyectos ejecutados con Asfalto Espumado por CONOCAL en México.
Fuente: Fernández & Blanco (2015)

Nombre Del Proyecto	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Volumen (m3)	Año De Construcción	Vida Útil En Años
Asfalto Espumado en la Carr. San Luis Potosí - Zacatecas	2,000	10.5	0.22	4,620	2011	10
Asfalto Espumado en la Carr. San Luis Potosí - Río Verde	38,000	12	0.12	54,720	2011-2012	15
	65,000	2	0.12	15,600		
Asfalto Espumado en Libramiento Norte de la Laguna	40,700	12	0.14	68,376	2012-2014	15
Asfalto Espumado en la Carr. San Luis Potosí - Villa de Arriaga	76,800	12	0.12	110,592	2014-2015	15
TOTAL:					253,908	M3

2.2 ASFALTO ESPUMADO

La tecnología de Asfalto Espumado, consiste en inyectar una pequeña cantidad de agua fría con aire comprimido sobre asfalto caliente, dicho proceso se lleva a cabo en una cámara de expansión (Figura 2.3) la cual es diseñada específicamente para éste propósito (Abdullah & Al-Abdul, 2015).



Figura 2.3 Cámara de Expansión para asfalto espumado (Ovalle, 2015).

Al encontrarse el asfalto en forma de espuma, se obtiene un estado temporal de baja viscosidad, y por ende puede ser agregado y mezclado con materiales a temperatura ambiente. Tal lo ejemplifica Jenkins (1999) al relacionar analíticamente el asfalto espumado con un panadero batiendo clara de huevo, donde dicha clara originalmente es viscosa, sin embargo al batir la misma, produce una espuma de baja viscosidad.

El asfalto espumado se distribuye principalmente hacia las partículas finas, por lo que; usualmente el contenido de asfalto se utiliza en el rango del 2-5% y se encuentra en función del contenido de finos del material a estabilizar (Saleh, Effect of rheology on the bitumen foamability and mechanical properties of foam bitumen stabilized mixes, 2007). Aun así es importante señalar lo que menciona Jenkins, Long, & Ebels (2007) donde utilizar una alta cantidad de asfalto propicia a una mayor flexibilidad en las mezclas pero

una menor resistencia a la deformación permanente. Años más tarde Dal Ben & Jenkins (2014) mencionan que los finos son necesario para una mejor dispersión en una estabilización con asfalto espumado; sin embargo también mencionan que el exceso de finos reduce la permeabilidad y la capacidad de drenaje, lo cual es otro criterio importante para una base hidráulica.

Al analizar la unión de mezcla asfáltica, el agregado se encuentra completamente cubierto por una capa de asfalto, a diferencia del anterior el asfalto espumado produce una unión discontinua (Figura 2.4).

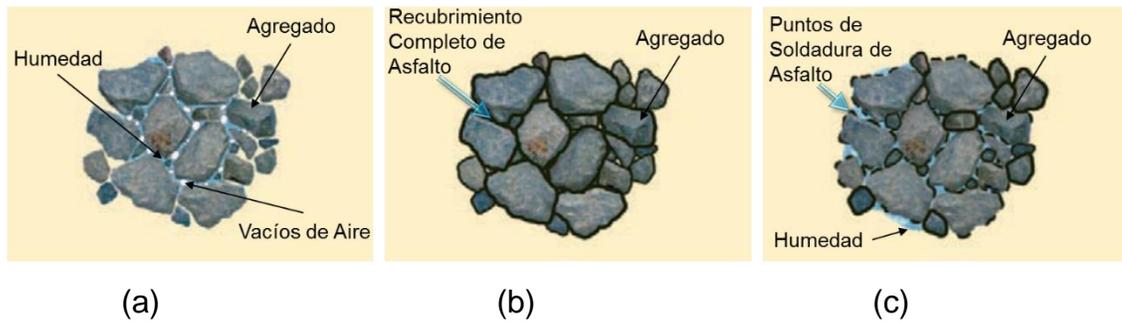


Figura 2.4 Material Granular (a) No Unido, (b) Unión Continua (c) Unión Discontinua. Fuente: Wirtgen (2012).

La mezcla de asfalto espumado funciona encapsulando y uniendo las pequeñas partículas finas, las que en conjunto con los agregados trabajan como pequeños puntos de soldadura (Wirtgen, 2012). Lo cual se traduce en una mezcla rígida propia por el agregado y flexible por los ahora nuevos puntos de soldadura de asfalto (Figura 2.5).

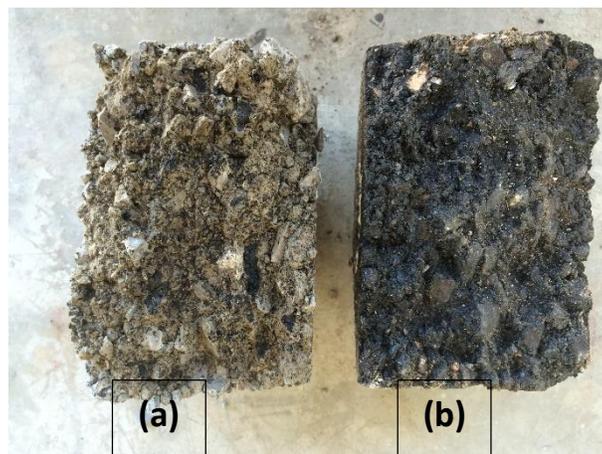


Figura 2.5 Comparación de una probeta de Base Estabilizada con Asfalto Espumado (a) vs Mezcla Asfáltica (b).

2.3 PARTICULARIDADES DEL ASFALTO ESPUMADO

Dentro de la investigación realizada por Jenkins *et al.* (1999) hacen énfasis en que para producir asfalto espumado, además de requerir ajustes de parámetros tales como la temperatura del asfalto, la cantidad y naturaleza del agua, también se requiere regular las condiciones en las que se recolecta la espuma.

Lo cual concuerda en Jenkins (2000) donde menciona que la Razón de Expansión (Re) y Vida Media ($\tau_{1/2}$) dependen de la temperatura y la forma del recipiente en donde se recolecta la espuma.

Donde:

Re =Representa el volumen de espuma expandido, dividido entre el volumen de asfalto original, y es medida como la altura de la espuma en función del tiempo.

$\tau_{1/2}$ = El tiempo en el cual la altura de la espuma disminuye a la mitad de su valor máximo.

Lo anterior se debe a que al graficar la Re en función del tiempo, es posible obtener su valor máximo así como el valor $\tau_{1/2}$, tal se puede apreciar en la Figura 2.6, para ese caso, Re tiene un valor máximo de 12, por consiguiente $Re/2$ es igual a 6, posteriormente al ingresar a dicha curva con el valor Re igual a 6, se obtiene una $\tau_{1/2}$ de 20 segundos aproximadamente.

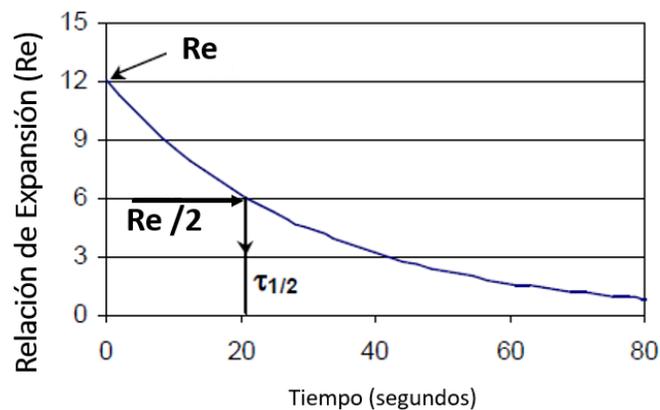


Figura 2.6 Relación de Expansión y vida media. Fuente: Jenkins (2000)

Adicional a la investigación realizada por Jenkins *et al.* (1999), Hailesilassie, Jerjen, Griffa, & Partld (2016), analizaron el decaimiento de la espuma en función de la altura de

expansión y el tiempo, así como la influencia del contenido de agua en la espuma del asfalto, véase **Figura 2.7**.

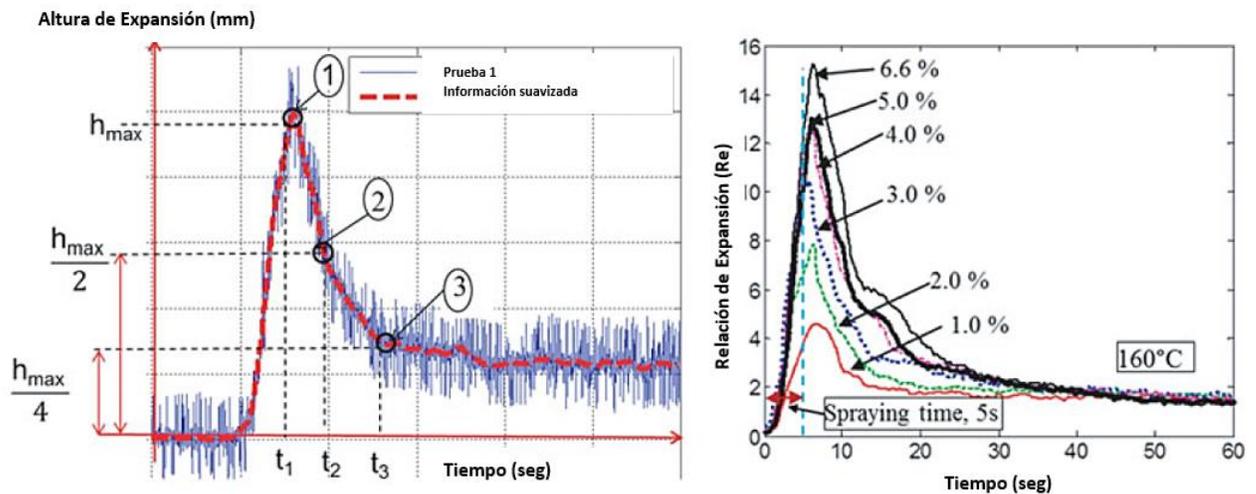


Figura 2.7 Decaimiento de espuma en función del tiempo (Izq.), Influencia del contenido de agua en la relación de Expansión (Der.). Fuente: Hailesilassie *et al.* (2016)

Cabe mencionar que al obtener una relación de expansión mayor, es posible alcanzar una mayor área de contacto para revestir los agregados, mientras que una vida media más larga favorecerá a tener una viscosidad más baja y por consiguiente asegurar una suficiente trabajabilidad de la mezcla (Ozturk & Kutay, 2013).

Así también al indagar en las propiedades espumantes que tiene dicha tecnología (Lesueur, y otros, 2004), se calentó el asfalto a una temperatura de 160°C, y le fue inyectado 6% de agua para producir asfalto espumado. Este último fue rociado dentro de una cubeta, la cual en un principio fue utilizada a temperatura ambiente, posteriormente fue pre-calentada a 100, 150 y 160°C respectivamente con el propósito de analizar el comportamiento de la espuma, dando como resultado los valores representados en la **Tabla 2.2**

Tabla 2.2 Influencia del tamaño de cubeta y temperatura sobre la Relación de Expansión y Vida Media de asfalto espumado. Fuente: Lesueur et al. (2004).

Tamaño de la cubeta (lts)	Temperatura de la cubeta (°C)	Relación de Expansión (RE)	$\tau_{1/2}$ (s)
22	Ambiente	15	12
22	100	20	11
22	150	23	10
22	160	24	11
10	160	19	31

Es a partir de analizar dicha tabla, que es posible apreciar el comportamiento que tiene la espuma al elevar la temperatura de la cubeta, ya que la Relación de Expansión (RE) se incrementa alrededor de un 60% en comparación de la cubeta a temperatura ambiente.

Asimismo, dentro de la misma investigación de Lesueur *et al.* (2004) se estudió el posible envejecimiento del asfalto después de haber elaborado la espuma, por lo que se tomaron muestras de asfalto provenientes del equipo varias horas antes y después de realizar el espumado, inclusive se tomaron muestras de asfalto después de calentar el asfalto durante dos días. Por ello, los autores requirieron caracterizar dichos asfaltos mediante pruebas estándar, conocidas actualmente como: la prueba de Penetración (ASTM D5 / D5M - 13), y la prueba de Punto de Reblandecimiento por Anillo y Bola (ASTM D36 / D36M - 09), además de técnicas analíticas tales como: la prueba de Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (ASTM D6348 - 12e1) conocida también como "FTIR", la prueba "DSC" denominada como Calorimetría Diferencial de Barrido (ASTM D3418-15), así como la Cromatografía de Gases en Columnas no Polares, conocida también como Destilación Simulada (SD por sus siglas en inglés). Dichos resultados permitieron concluir que se apreció un ligero endurecimiento del asfalto después de realizar el espumado, del mismo modo el punto de reblandecimiento aumentó ligeramente, mientras que por otro lado la penetración disminuyó sutilmente, lo cual se aprecia en la Tabla 2.3. Por lo anterior los autores concluyen que el envejecimiento del asfalto al ser espumado es mínimo, ya que el comportamiento reológico del asfalto no se ve afectado en gran medida.

Tabla 2.3 Evolución de las propiedades de los asfaltos antes y después de espumar.
Fuente: Lesueur et al. (2004)

Asfalto	Tratamiento	Pen 25° C (1/10 mm)	Temp. Anillo y Bola (°C)
A	Original	89	46
	Antes de Espumar	80	46
	Después de Espumar	78	47
	Antes de Espumar (Varias Horas)	72	47.4
	Después de Espumar (Varias Horas)	60	49.4
	Límites de CEN (Comité Européen de Normalisation, por sus siglas en Francés) después del RTFOT	41	55
B	Original	86	47
	Antes de Espumar	82	47.4
	Después de Espumar	76	47.2
	Límites CEN Después del RTFOT	40	56
C	Antes de Espumar	58	49.4
	Después de Espumar	56	50
	Límites CEN Después del RTFOT	29	58.4

De dicha investigación Lesueur *et al.* (2004) manifestaron que la composición del asfalto no influye considerablemente en las propiedades espumantes, ya que los resultados de dicha investigación muestran que la espuma es formada de manera similar independientemente del origen del asfalto, concluyendo así que es el mismo fenómeno físico el responsable de la formación de la espuma y no las propiedades del asfalto. Sin embargo cabe señalar que los asfaltos modificados juegan un papel importante en la operación del equipo de espumado. Debido a que el fabricante de la máquina de espumado (Wirtgen) a nivel laboratorio menciona que al utilizarse un asfalto modificado es decir un asfalto duro, pudiese propiciar a una obstrucción de la boquilla e incluso de la cámara de expansión al reducir considerablemente la temperatura del asfalto al entrar en contacto con el agua.

La velocidad de disipación de la humedad en el asfalto espumado depende principalmente en el grado PG y el tipo de asfalto mencionan Ozturk & Kutay (2012), ya

que en su estudio observaron que los asfaltos con un alto grado PG (rígidos), disipaban la humedad más lentamente en comparación de los asfaltos con grado PG más bajo (blandos). Concluyendo así que los asfalto de alto grado PG podrían ser más susceptibles al daño por humedad en pavimentos con asfalto espumado.

Por otra parte, en años posteriores, analizando las propiedades reológicas de un asfalto espumado, Yu, Liu, & Dong (2016) estudiaron tres diferentes asfaltos mediante el Reómetro de Corte Dinámico (DSR, por sus siglas en inglés), el Reómetro de Viga a Flexión (BBR, por sus siglas en inglés), pruebas de Índice de Penetración (PI, por sus siglas en inglés) y Viscosidad después de haber sido espumados con el equipo de Laboratorio Wirtgen WLB 10S; de la cual concluyeron que el desempeño a alta temperatura disminuyó en un 2.6%, 9.3% y 1.2% para el asfalto PG 64-22, Asfalto del Lago Trinidad (TLA) Modificado, y SBS Modificado. Del mismo modo también, pudieron apreciar que la sensibilidad a la temperatura evaluada mediante el PI, reflejó que la espuma del asfalto PG 64-22 y TLA ayuda a reducir la susceptibilidad a la temperatura debido a un aumento en el punto de reblandecimiento y una reducción del valor de penetración.

2.4 COMPORTAMIENTO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO (BSM)

Las pruebas realizadas por He y Wong (2007) demuestran que la resistencia a la tracción indirecta (ITS) se ve afectada dependiendo del grado del asfalto y el contenido de RAP utilizado en la mezcla, tal es el caso de que el valor de ITS se ve reducido cuando se incrementa el contenido de RAP. Mientras que por otra parte en Betti, Airey, Jenkins, Marradi, & Tebaldi de (2016) demuestran que al estudiar la cal como filler activo en vez de cemento, los resultados condujeron a un comportamiento similar en la mezcla en cuanto a capacidad de soporte (carga), lo que se traduce en que la cal puede ser utilizada en vez de cemento. Lo anterior debido a que la dispersión del asfalto en la muestra se facilita al utilizar filler activo, siendo este último el que une y atrapa las pequeñas gotas de asfalto.

Posteriormente Marek & Anna (2013) analizaron los valores de ITS (secos y saturados) de un material de base granular, concluyendo que al incrementar el contenido de asfalto espumado en dicha mezcla reciclada, el valor de ITS también aumenta. No

menos importante es mencionar que al producir una mezcla estabilizada con asfalto espumado es crucial vigilar los contenidos de humedad de los materiales, ya que los agregados húmedos propician a una inadecuada dispersión del asfalto y por consiguiente mala unión de los mismos; lo que conlleva a un impacto en cuanto al daño inducido por humedad, así como la reducción de la durabilidad a largo plazo (Abbas, y otros, 2013).

En Jenkins *et al.* (2008), hacen referencia que aun existiendo las pruebas ITS y UCS (Indirect Tensile Strength y Unconfined Compressive Strength, por sus siglas en inglés respectivamente), la industria carretera requiere de un procedimiento de prueba más confiable para la caracterización y QA/QC (Quality Control/ Quality Assurance, por sus siglas en inglés) de los Materiales Estabilizados con Asfalto (MEA). Tal es el caso que, el autor menciona que en los talleres realizados en la Conferencia de Pavimentos Asfálticos para Sudáfrica ó CAPSA por sus siglas en inglés (2004, 2007), se discutió sobre las mejoras de metodologías para ensayo para materiales granulares, como por ejemplo la posible sustitución de la prueba de CBR (California Bearing Ratio por sus siglas en inglés) Siendo para ese entonces, la implementación de las pruebas triaxiales confinadas a diferentes presiones con el propósito de obtener el valor de cohesión y fricción interna del suelo. Complementando dicha ideología, una de las pruebas propuestas en la presente investigación contempla subsanar dicho déficit con estudio adicional a la metodología hasta ahora existente, la cual consiste en realizar una prueba triaxial cíclica con el propósito de predecir el comportamiento del material bajo cargas cíclicas.

Por otra parte, la literatura de Wirtgen (2016) menciona que entre los beneficios que se obtiene al estabilizar los materiales granulares, es incrementar las propiedades cortantes del material como la Cohesión (C) sin verse modificado el Ángulo de Fricción (ϕ) (Figura 2.8). En dicha imagen es posible apreciar que el valor de cohesión del material aumenta sustancialmente mientras que el ángulo de fricción permanece casi intacto.



Figura 2.8 Propiedades cortantes de los materiales estabilizados con Asfalto Espumado.
Fuente: Wirtgen (2016)

Dentro de otras ventajas que menciona Shatec (2013) es que al reciclar el RAP de la vía carretera implementando la tecnología de asfalto espumado, es posible reducir una cantidad sustancial de camiones en tránsito para retiro y sustitución de material en comparación de utilizar solo dos camiones para transportar asfalto, véase Figura 2.9. Adicionalmente a la competitividad de costo, la estabilización con asfalto espumado es ambientalmente amigable con emisiones más bajas que las producidas por una mezcla asfáltica en caliente menciona Saleh (2007); Además que es posible reducir el consumo de producción en un 25% ya que se utilizan agregados a temperatura ambiente.



Figura 2.9 Rehabilitación de 1 Milla-1 Carril de Autopista a 3" de profundidad. (Shatec, 2013).

Así mismo Wirtgen (2015), en su video publicado en línea, hace referencia a los beneficios que se consiguen al realizar una Rehabilitación de Pavimento utilizando el proceso de reciclaje en frío mediante la planta móvil Wirtgen modelo KMA-220 (véase Figura 2.10). Dichos beneficios son enlistados a continuación

- Reutilización de materiales
- Ahorro de recursos
- Cortos tiempos de construcción
- Eficiencia Energética
- Amigable con el Medio Ambiente
- Enormes ahorros económicos
- Alta esperanza de Vida



Figura 2.10 Reciclado en Frío en Planta con Asfalto Espumado con el Equipo KMA-220. Fuente: Wirtgen (2015).

2.5 MÓDULOS DE RESILIENCIA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Al analizar las metodologías que existen hoy en día para diseñar pavimentos, éstas consideran entre otros, una propiedad fundamental denominada Módulo de Resiliencia (M_R), con la cual se pretende conocer el desempeño que tendrá el material en dicha estructura al paso de los años, ya sea autopista, aeropista, carretera, o cualquier otro tipo de vialidad.

Dicha propiedad es utilizada en el diseño de pavimentos mediante la metodología empírico-mecanicista, debido a que es un análisis en el cual se determina la respuesta del material ante la carga del tránsito. Para ello se requiere modelar e implementar una carga dinámica con diferentes magnitudes, la cual representa la carga de tránsito, así como una presión de confinamiento con el propósito de representar el confinamiento real del material en campo; para todo lo anterior se emplea la carga en forma sinusoidal, la cual es resultante de la velocidad del vehículo y la profundidad del punto al que se hace referencia en el estudio. El Módulo elástico o Módulo de Resiliencia (M_R) de los materiales para pavimentos, es una propiedad importante para cualquier procedimiento de diseño o análisis para pavimentos flexibles (AASHTO, 1993). El valor M_R de suelos y materiales para pavimentos, es una medida del módulo de elasticidad del material a un cierto confinamiento. Del mismo modo el M_R , es utilizado para el diseño de pavimentos por diferentes metodologías, tal es el DISPAV (Corro, y otros, 2014), AASHTO-93 (AASHTO, 1993), MEPDG (NCHRP, 2002), etc.

Para entender más acerca del Módulo Resiliente, Garnica, Gómez, & Sesma (2002) mencionan que existen deformaciones Resilientes, llamadas también deformaciones elásticas, las cuales tienen un comportamiento de recuperación instantáneo; mientras que por otro lado, existen las deformaciones plásticas, denominadas también deformaciones permanentes, y son éstas últimas las que permanecen en la estructura aún después de retirar la carga, el comportamiento típico de un espécimen durante un ciclo de una carga y descarga es posible apreciarse en la Figura 2.11.

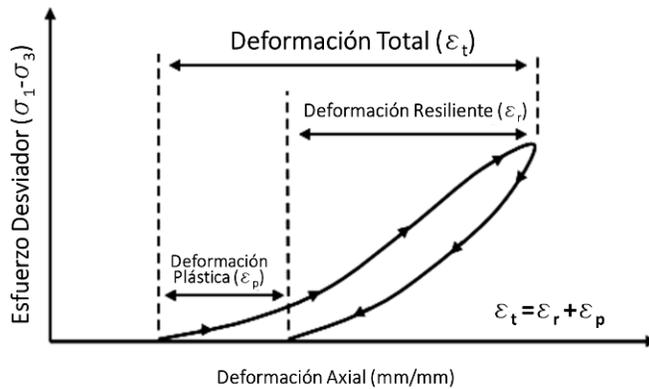


Figura 2.11 Respuesta del espécimen a un ciclo de carga-descarga. Fuente: Buchanan (2007)

Es entonces que al analizar un material después de ciertos ciclos de carga-descarga la deformación permanente se acumula de ciclo en ciclo, sin embargo al analizar cada ciclo individualmente, es posible apreciar que dicha deformación disminuye hasta prácticamente desaparecer, es entonces que la muestra comienza a tener deformaciones meramente recuperables, es en ese momento cuando se considera que el material ha alcanzado un comportamiento Resiliente.

Mientras que para representar de una forma más esquemática, tal lo menciona Garnica, Pérez, & Gómez (2000), la definición de módulo de resiliencia, se observa después de un número “N” de ciclos de carga, es entonces que el módulo llega a ser aproximadamente constante (Módulo de Resiliencia) y el comportamiento del suelo puede asumirse entonces como elástico, véase Figura 2.12

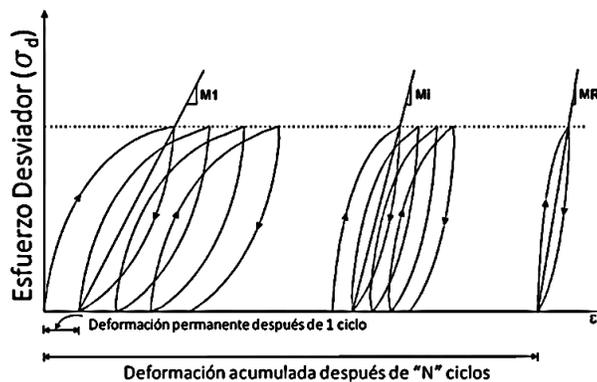


Figura 2.12 Definición de Módulo de Resiliencia. Fuente: Garnica et al. (2000)

Debido a las diferencias existentes entre el comportamiento real de los pavimentos y el idealizado, es hacia los años de 1950 donde se introduce el parámetro Módulo de Resiliencia (M_R), (Hveem, 1955; Seed *et al.*, 1962, Brown, 1966, citados por González, 2014), dicho Módulo se define como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial sobre la deformación axial recuperable, y es expresado de la siguiente manera:

$$M_R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_3 = Esfuerzo principal menor

σ_d = Esfuerzo desviador

ϵ_{axial} = Deformación recuperable

Es hacia el año de 1971 donde Barksdale analiza los tiempos de pulsación a diferentes profundidades bajo la superficie del pavimento, así como a diferentes velocidades, esto con el propósito de simular las condiciones de campo en laboratorio. De lo anterior se muestran los resultados obtenidos en la Figura 2.13, en la cual se puede apreciar que, a mayor velocidad del vehículo, el tiempo de aplicación de carga disminuye, de la misma manera se puede apreciar que el tiempo de la duración de la carga aumenta con la profundidad.

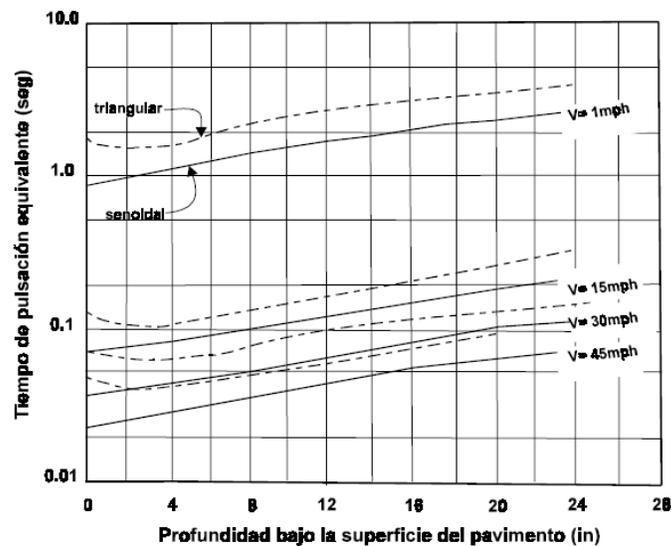


Figura 2.13 Tiempo de pulsación para el esfuerzo vertical con carga senoidal y triangular (Barksdale, 1971)

Por lo anterior y en vista que la velocidad de los vehículos no siempre son constantes, se recomienda con el propósito de estandarizar la onda senoidal a un tiempo de duración de 0.1 segundos en aplicación de carga, y un periodo de reposo de 0.9 (Huang, 1993).

Aún con el análisis de todo lo anterior, los valores de Módulo de Resiliencia suelen ser afectados por distintos factores, entre los más destacados son las condiciones físicas existentes del suelo, las condiciones de esfuerzo, entre otros. Tal es el caso de la reducción del módulo al incrementar el contenido de agua o saturación de los suelos de subrasante (Barksdale, 1972; Fredlund, 1977; Drumm *et al.*, 1997; Huang, 2001; Buatila, 2003; Titi *et al.*, 2006). De la misma manera Drumm *et al.* (2006) estudiaron la variación del módulo de resiliencia con un incremento en el contenido de agua posterior a la compactación; obteniendo así que al aumentar el grado de saturación el Módulo de Resiliencia decrementa.

De la misma manera Thompson y Robnett (1979) indican que los suelos con un Índice Plástico bajo, un Límite Líquido bajo así como un alto contenido de materia orgánica, propician a obtener valores de Módulos de Resiliencia bajos. Aunque por otro lado al analizar Rada y Witczak (1981), demuestran que las variables que más tienen impacto en el Módulo de Resiliencia de los materiales granulares son: el grado de compactación, grado de saturación y estado de esfuerzo. Mientras que para materiales triturados angulosos, el incremento en el contenido de agua conduce a una disminución del módulo de resiliencia. Y en caso contrario los especímenes con alto peso volumétrico seco obtendrán altos valores de módulo de resiliencia.

Debido a las observaciones realizadas por Garnica *et al.* (2001) acerca del Módulo Resiliencia, este parámetro no es una propiedad constante del suelo, sino que depende de muchos factores. Los principales son: número de aplicaciones del esfuerzo, tixotropía, magnitud del esfuerzo desviador, método de compactación y condiciones de compactación.

Cabe señalar también que existe una gran variedad de dispositivos que son utilizados para la medición del módulo de resiliencia en suelos cohesivos, tal lo menciona Garnica *et al.* (2002). El empleo de esos equipos varía de acuerdo a los factores o parámetros con los cuales ha de ser comparado el M_R , para lo cual dentro de los materiales granulares se encuentran: el tipo de material, tamaño del espécimen, tipo de compactación, peso específico, granulometría, magnitud del esfuerzo aplicado, contenido de agua, etc. Dentro de los dispositivos utilizados con mayor frecuencia suelen encontrarse: la columna resonante y el equipo triaxial cíclico con el cual se realizará el estudio de M_R .

Es evidente también que el contenido de humedad propicia indudablemente a la densidad de la muestra y por consiguiente su valor de Módulo (Austroads Ltd., 2015). Por lo que, decidir si un material es adecuado o no para su utilización de pavimentos, suele estar influenciado por la susceptibilidad a la humedad, por tal razón, el papel de la estabilización de materiales con asfalto espumado, conllevaría a jugar un papel importante para reducir la susceptibilidad de la misma mejorando el desempeño mecánico de los materiales a estabilizar en el diseño de pavimentos por cualquier metodología.

2.5.1 MODELOS CONSTITUTIVOS PARA MÓDULOS DE RESILIENCIA

El Departamento de Transporte de los Estados Unidos (2004), USDOT por sus siglas en inglés. Llevó a cabo una investigación para predecir Módulos de Resiliencia a partir de las propiedades índice de los suelos. Con ella se pretendía explicar las características no lineales de esfuerzo-deformación de los suelos de la sub-rasante. En la investigación antes mencionada, se han elaborado y propuesto diferentes modelos matemáticos, los cuales permiten predecir el comportamiento de los suelos y agregados (George, 2004). Con el propósito de conocer las variaciones de los modelos elaborados anteriormente, se plasman los mismos a continuación:

Dunlap (1963)

$$M_R = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{k_2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

k_1, k_2 = Coeficientes obtenidos del análisis de regresión.

P_a = Presión atmosférica.

σ_3 = Esfuerzo de confinamiento

Seed, Mitry, Monismith, & Chan (1967)

$$M_R = k_1 \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

θ = Esfuerzo efectivo ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

k_2 = Coeficiente obtenido del análisis de regresión

Moossazadeh & Witczak (1981)

$$M_R = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

k_2 = Coeficiente obtenido del análisis de regresión

σ_d = Esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$)

May & Witczak (1981) en conjunto con la NCHRP (2000) propusieron un para describir el comportamiento no lineal en las pruebas triaxiales cíclicas. Con este modelo se considera el efecto de cortante del suelo, esfuerzo de confinamiento y esfuerzo desviador. Todo en términos del esfuerzo desviador y esfuerzo efectivo.

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3} \quad \text{Ecuación 5}$$

Años después (Uzan, 1992) introdujo un esfuerzo cortante octaédrico en lugar del esfuerzo desviador, con el cual se podría explicar de mejor manera el estado de esfuerzo del material. Dicho modelo se conoce como el "Modelo Universal" k1-k3. La universalidad del presente modelo radica en la capacidad de representar conceptualmente todo tipo de suelos cohesivos desde suelos puramente cohesivos hasta los suelos no cohesivos.

$$M_R = k_1 * Pa * \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k_3} \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)^{1/2}$$

Por otra parte (Amber & Von Quintus, 2002), establecieron un modelo para diferentes tipos de materiales, con parámetros k_1, k_2 y k_3 , donde dichos factores son principalmente factores para suelos arenosos, limosos y arcillosos.

$$M_R = k_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa}\right)^{k_2} \left[\left(\frac{\tau_{oct}}{Pa}\right) + 1\right]^{k_3} \quad \text{Ecuación 7}$$

2.5.2 MODELO DE PREDICCIÓN DE MÓDULOS DE RESILIENCIA BASADOS EN UNA ECUACIÓN CONSTITUTIVA.

Tal lo menciona George (2004) la mayoría de las agencias estatales de autopistas de U.S.A. (United States of America, por sus siglas en inglés), no realizan pruebas de M_R en laboratorio, pero si estiman los valores de los mismos, todo con base en la experiencia o con otras propiedades de los materiales. Sin embargo queda latente que dicho valor solo sea el estimado para una temporada del año.

El programa de estudio para el Comportamiento a Largo Plazo del Pavimento (Long Term Pavement Performance, por sus siglas en inglés) realizado por Amber & Von Quintus (2002) para pruebas de M_R , se examinó a detalle con el propósito de identificar anomalías o posibles errores en la base de datos, así como el efecto de las variables ensayo, como lo son los procedimientos de prueba y toma de muestras para Módulos de Resiliencia

Sin embargo para la guía de diseño del año 2002, se utiliza el valor de M_R como la propiedad para todos los materiales discontinuos (granulares) así como los suelos de subrasante (Amber & Von Quintus, 2002). Constituyendo así la siguiente versión de la ecuación mostrada a continuación:

$$M_R = k_1 P_a \left[\frac{\theta - 3k_6}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{k_3} \quad \text{Ecuación 8}$$

θ = Esfuerzo efectivo ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_2 = Esfuerzo principal intermedio σ_3 = para la prueba de M_R en el espécimen cilíndrico

σ_3 = Esfuerzo principal menor/ Presión de confinamiento

τ_{oct} = Esfuerzo cortante octaédrico:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$$

k_1, k_2, k_3, k_6 = Constantes de regresión

2.5.3 MÓDULOS DE RESILIENCIA EN BASES ESTABILIZADAS.

Tal lo menciona Amber & Von Quintus (2002) el valor del coeficiente k_1 es proporcional al Módulo de Young's, por lo que el valor de k_1 siempre deberá ser positivo. Por otra parte al incrementar el esfuerzo volumétrico (θ) se produce una rigidez del material resultando en un mayor valor de M_R , por ende el valor de k_2 también debe ser positivo. Mientras que el valor de k_6 está previsto para considerar la presión de poro del agua o cohesión, por lo que el valor de k_6 puede ser negativo. Sin embargo el coeficiente k_3 es el exponente del esfuerzo cortante octaédrico, por lo que el valor de k_3 debe ser negativos ya que al aumentar la tensión de corte se producirá un reblandecimiento del material, produciendo un valor de M_R inferior.

Dentro de la investigación realizada en Kim, Labuz, & Dai (2007), mencionan que en las pruebas de M_R realizadas a bases adicionadas con material RAP. Pudieron apreciar que al utilizar el 65% del contenido de humedad óptimo fueron considerablemente más rígidas que los especímenes con el 100% de su humedad óptima. Adicionalmente, ejecutaron pruebas con diferentes porcentajes de RAP, concluyendo así que al utilizar una mezcla 50% RAP-50% Agregado, el espécimen alcanza un valor de M_R de 100% agregado a un valor de confinamiento más bajo. Sin embargo en dicha investigación también fue posible apreciar que durante la secuencia de acondicionamiento, los especímenes con

RAP presentar una deformación permanente mucho mayor en comparación del 100% Agregado.

Mientras que para la investigación realizada por Dal Ben & Jenkins (2014) mencionan que para las pruebas de Módulo de Resiliencia, se elabora una probeta cilíndrica con dimensiones de 150 x 300 mm (Ancho x Alto) aplicándose una carga cíclica repetida con tipo de onda Haversine, siendo esta última de 0.1 segundos de carga y 0.9 segundos de descarga para un total de 100 repeticiones.

2.6 HIPÓTESIS, OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN

2.6.1 HIPÓTESIS

La inclusión del indicador del Módulo de Resiliencia asegurará un mejor desempeño mecánico en los diseños de mezcla estabilizada con asfalto espumado en México.

2.6.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño mecánico de una base estabilizada con la tecnología de asfalto espumado para su aplicación en pavimentos.

2.6.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades mecánicas de una base reciclada con asfalto espumado.
- Evaluar la influencia del filler en las propiedades de cohesión de la base reciclada con asfalto espumado.
- Determinar la pertinencia de manual de Wirtgen en el diseño de bases recicladas con asfalto espumado.
- Evaluar la influencia del porcentaje de RAP diseño de una base reciclada con asfalto espumado.

2.6.4 JUSTIFICACIÓN

Los pavimentos sustentables han sido definidos como aquellos pavimentos que son seguros, eficientes, económicos y amigables con el medio ambiente, además de satisfacer las necesidades de los usuarios actuales sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras. (Chan, Lane, Kazmierowski, Raymond, & Lee, 2009).

En la actualidad, la tecnología de asfalto espumado obtiene ventajas debido a su capacidad de recubrimiento, trabajabilidad y propiedades de compactación, además de los ahorros económicos y ambientales mencionados con anterioridad. Cabe señalar también que paulatinamente la técnica de reciclaje asfalto espumado está ganando la aceptación del medio, debido que ésta brinda una nueva posibilidad de utilizar el RAP como material para Bases Hidráulicas, además de propiciar una técnica adecuada para la mejora de materiales de construcción de una manera eficiente, económica y además de todo, apropiada para la reutilización de materiales pétreos.

Dichos beneficios ambientales pudieron ser cuantificados (Lane, Kazmierowski, & Alkins, 2008), los cuales son:

- 62% de ahorros en consumos de agregados
- Ahorros en emisiones de gases efecto invernadero
- Reduce emisiones de Bióxido de Carbono en un 52%
- Reduce emisiones de Óxido Nítrico/ Bióxido de Nitrógeno en un 54%
- Reduce emisiones de Bióxido de Azufre hasta en un 61%

Dentro de la necesidad de realizar la presente investigación se encuentra conocer la viabilidad y confiabilidad de la metodología existente, verificando el comportamiento de la mezcla estabilizada con asfalto espumado y filler activo. Primordialmente es necesario conocer los valores de Módulo de Resiliencia para materiales estabilizados mediante la tecnología de asfalto espumado, debido a que no existen parámetros lineales ó modelos de predicción que permitan estimar el valor MR de la mezcla, principalmente por el hecho que no existe correlación alguna con las variables de diseño de la mezcla (contenido asfáltico, granulometría, filler activo, entre otros). Adicional a lo anterior, las guías de diseño empírico-mecanicistas requieren un valor de MR que caracterice al material propuesto en el diseño de pavimentos, tal es el caso de la MEPDG, DISPAV, IMT-PAVE 3.0, donde las anteriores requieren de dicho parámetro para predecir el comportamiento del pavimento.

Cabe mencionar que la evaluación del Módulo de Resiliencia es posible ser determinado mediante (Malla *et al.*, 2007):

1. Pruebas de Laboratorio de carga cíclica

2. Correlaciones de propiedades Índice
3. Retro calculo mediante pruebas no destructivas

Haciendo énfasis al primer punto es posible realizar las pruebas en laboratorio con el objetivo de investigación, sin embargo hacia el punto número dos, no es posible realizar una correlación al ser un material RAP estabilizado mediante asfalto espumado y debido a que en México no existe registro o parámetro alguno. Mientras que el punto tres no se encuentran dentro del alcance de la presente línea de investigación.

Por lo anterior, se requiere realizar la investigación para conocer los valores de Módulos de Resiliencia para **Mezcla I: RAP + Base Recuperada (80%) + Material Virgen 1-1/2" (20%)**, la cual fue estabilizadas mediante la tecnología de Asfalto Espumado. Dicha prueba es elaborada para conocer el comportamiento de la influencia de la adición en porcentaje de asfalto, así como el desempeño de la atribución de filler activo.

Por tal razón y debido al éxito de implementar dicha tecnología en otros países, surge en México la necesidad de evaluar el desempeño de la misma, debido a que no se cuenta con alguna normativa, metodología mexicana o control de calidad que marque la pauta del diseño y evaluación del mismo. No obstante, México ya cuenta con ciertas obras en las cuales se ha implementado dicha tecnología, tal se muestra a continuación en la Figura 2.14.

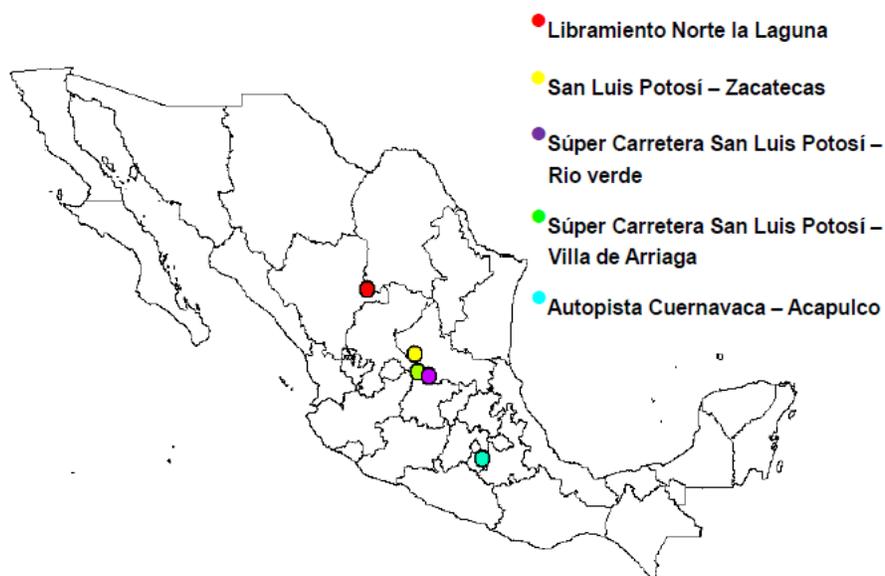


Figura 2.14 Obras Realizadas con Asfalto Espumado en México (Ovalle, 2015)

3. METODOLOGÍA

La tecnología de asfalto espumado tiene como propósito construir una base estabilizada de alta calidad mediante la reutilización de los materiales existentes en la estructura del pavimento a rehabilitar. Dando como resultado una base granular con unión discontinua, mejorando tanto su cohesión como su susceptibilidad a la humedad, manteniendo el ángulo de fricción interna de la base hidráulica

De acuerdo con la metodología existente por parte de la TG2 (Asphalt Academy, 2009) y el Manual de reciclaje de Wirtgen (2012), para el diseño de una base estabilizada con asfalto espumado, se debe tener en cuenta las diferentes etapas de análisis (Figura 3.1):

- Caracterización de los materiales a utilizar (Material pétreo, asfáltico y RAP).
- Determinación de la granulometría de diseño
- Determinación de las propiedades espumantes del asfalto
- Diseño de la mezcla de materiales (Fórmula de trabajo)
 - Nivel 1: Determinación la necesidad de “Filler Activo”.
 - Nivel 2: Determinación el contenido óptimo de asfalto espumado.
 - Nivel 3: Determinación de propiedades mecánicas.



Figura 3.1 Elementos Fundamentales para el Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado.

Es importante señalar que los materiales utilizados en la estructura de pavimentos tienen un comportamiento acorde al tipo de naturaleza del mismo, así como el tratamiento, estabilización o incorporación de otro material adicional. Es decir, si a éstos se les ha añadido cierta cantidad de cemento o asfalto, variará entonces el comportamiento del mismo, siendo más rígido y/o flexible, tal es el caso de la **Figura 3.2** mostrada a continuación.

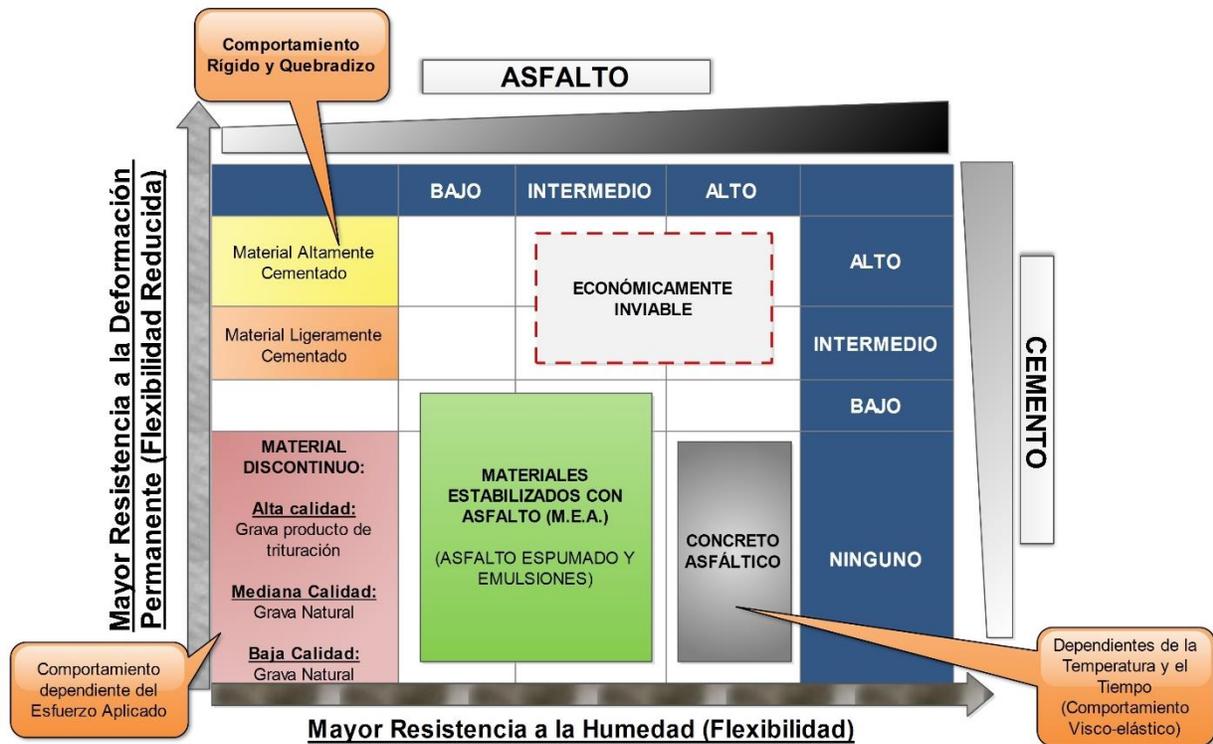


Figura 3.2 Comportamiento de los materiales en un pavimento. Elaboración propia con fuente Asphalt Academy (2009).

Mientras que para simplificación de los puntos mostrados anteriormente, se presenta un diagrama de flujo con base en la metodología del manual Wirtgen (2012), el cual se puede apreciar en la Figura 3.3.

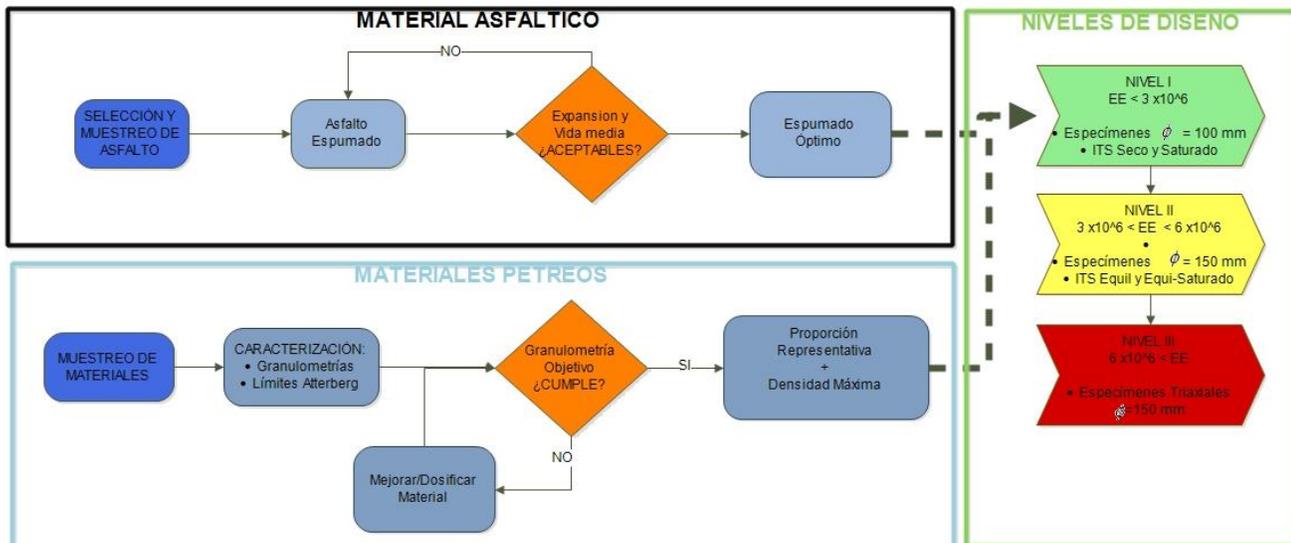


Figura 3.3 Diagrama de Flujo Para Diseño de Base Estabilizada con Asfalto Espumado. Elaboración propia con fuente Wirtgen (2012).

No obstante, a pesar de la metodología existente, se pretende complementar el proceso de diseño existente con un Indicador de diseño adicional. Ya que, además de analizar el comportamiento mecánico del material mediante una prueba estática (triaxial) es importante conocer con el comportamiento mecánico mediante una prueba dinámica (triaxial cíclica). Para que de esta manera, sea posible predecir el comportamiento del material estabilizado frente a las cargas cíclicas aplicadas en el pavimento, es decir que, para un análisis de diseño de pavimentos sea posible contemplar y conocer el comportamiento del material mediante el parámetro de Módulo de Resiliencia. A continuación se muestra el diagrama con la metodología propuesta, véase **Figura 3.4**.

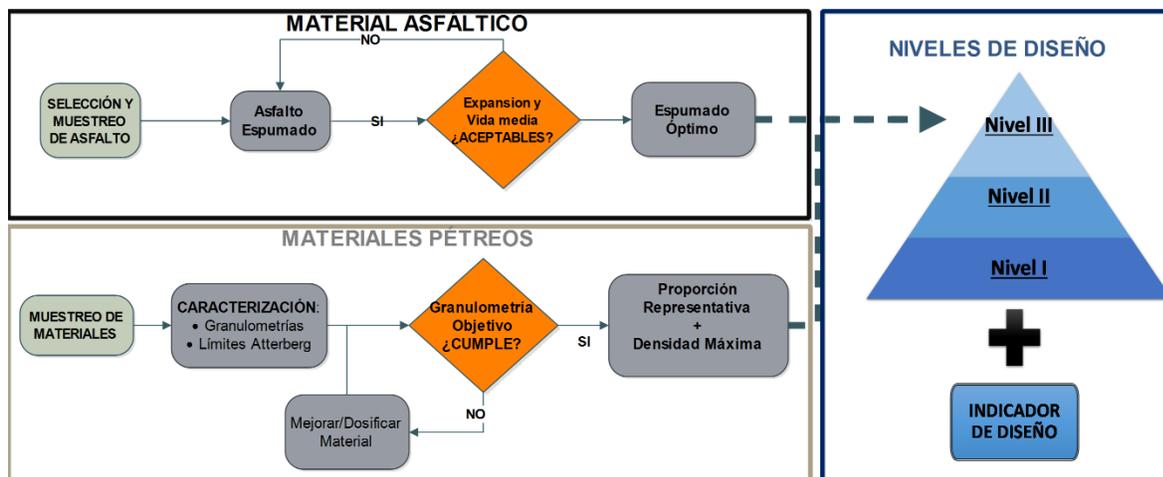


Figura 3.4 Propuesta del Diseño para una Base Estabilizada con Asfalto Espumado aplicable a México. Fuente: Elaboración propia.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

El presente inciso presenta los diferentes ensayos que se deben de realizar para la caracterización de los materiales que se van a utilizar en el diseño de las base estabilizada con asfalto espumado.

3.1.1 MATERIAL ASFÁLTICO

El material asfáltico puede ser clasificado mediante dos metodologías, ya sea por medio de viscosidad o por medio de su Grado PG. Sin importar cualquiera de estas dos metodologías que se seleccione, se debe tener en cuenta que para la elaboración del asfalto espumado no se pueden utilizar asfaltos modificados, ya que éstos imposibilitan crear una espuma lo suficientemente constante debido a la obstrucción de las líneas de conducción así como boquillas en la máquina de espumado, además que se requiere de una mayor temperatura para poder crear la espuma.

3.1.1.1 GRADO PG Y RESULTADOS

En el presente estudio, se lleva a cabo la clasificación del ligante asfáltico mediante la metodología del Grado PG (Performance Graded, por sus siglas en inglés), conocido en México como el Grado del Desempeño del asfalto, lo anterior con base en la norma Estadounidense (ASTM D6373-13) y Mexicana (N-CMT-4-05-004/05). Por lo que el propósito de conocer el grado PG en la presente investigación es acreditar que el asfalto

AC-20 producido por Petróleos Mexicanos (PEMEX), sea un asfalto blando (viscoso a baja temperatura), y no uno modificado (regularmente viscoso a alta temperatura), y que además pueda ser utilizado como un asfalto idóneo para la estabilización con asfalto espumado.

Dentro de la normativa mexicana, se considera analizar el rango de temperaturas a las cual el cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente, y que por ende, pueda ser utilizado en una región del país en específico donde se conozcan los rangos de operación del pavimento. Tal es el caso que los grados PG necesarios para la capa de rodadura pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperatura que se registra en el territorio mexicano (N-CMT-4-05-004/05, 2005), tal se puede apreciar en la Figura 3.5, producto de la normativa N-CMT-4-05-004/05. Siendo que a partir de dicha figura es posible realizar ajustes de grado PG por clima de acuerdo a la intensidad de tránsito esperada y la velocidad de operación, véase *Tabla 3.1* también la procedente de la misma normativa.

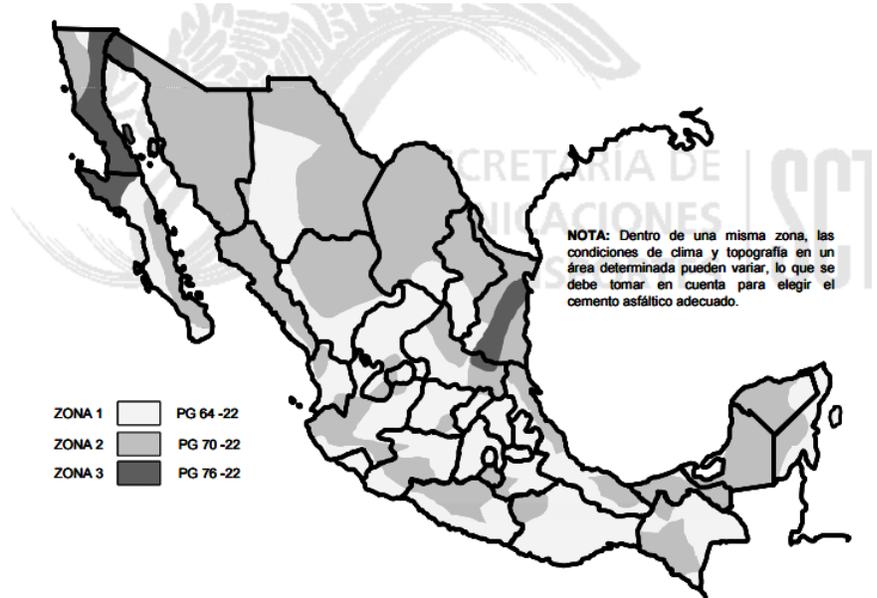


Figura 3.5 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos grado PG. Fuente: N-CMT-4-05-004/05

Tabla 3.1 Ajustes de grado PG en el territorio Mexicano

Intensidad del tránsito (ΣL_{10}) ^[1]	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (Entre 10 y 30 km/h)	Ajuste por tránsito detenido (Cruceos)
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L_{10} > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

[1] ΣL_{10} = Número de ejes equivalentes de 8,2 t (ESAL), esperado durante un periodo de servicio del pavimento de 10 años.

Por lo anterior, el uso de asfaltos con diferentes grados de desempeños son necesarios a lo largo del territorio mexicano. Sin embargo, es importante mencionar que los asfaltos “naturales” producto de la refinación de PEMEX, se encuentran regularmente en una clasificación PG 64 -16 ó 64 -22, por lo que para aumentar dichos grados PG, generalmente es necesario añadirse un aditivo el cual permita alcanzar dicho desempeño, pasando a ser entonces “Asfaltos Modificados”.

3.1.2 MATERIAL PÉTREO Y RAP

Después de haber realizado el muestreo del material a utilizar se requiere determinar dos características físicas: la granulometría y la plasticidad. La Figura 3.6 presenta el diagrama de flujo de esta etapa del diseño.



Figura 3.6 Diagrama de Flujo para Materiales Pétreos.

3.1.2.1 PLASTICIDAD DE LOS MATERIALES

La plasticidad de los materiales es determinada mediante la Norma “Límites de Consistencia” (M-MMP-1-07/07), véase Figura 3.7. Esta prueba además conocer la plasticidad de los materiales, tiene como objetivo conocer mediante el valor del Índice Plástico (IP), la necesidad de realizar un pre-tratamiento al material pétreo (Tabla 3.5). Este ensayo solo es realizado al material pétreo.



Figura 3.7 Elaboración de la Norma (M-MMP-1-07/07, 2007).

Tabla 3.2 Determinación de pre-tratamiento con Filler. Fuente: Wirtgen (2012)

ÍNDICE PLÁSTICO < 10	ÍNDICE PLÁSTICO > 10
Llevar a cabo pruebas con especímenes de 100 mm de diámetro para determinar la necesidad de añadir cemento o cal hidratada.	Pre-tratamiento del material con cal hidratada CIC (Consumo Inicial de Cal) se debe determinar primero mediante la prueba de pH apropiada.)

3.1.2.2 GRANULOMETRÍA

Para la realización del ensayo de granulometría, se realiza una homogeneización del material así como la reducción de las muestras de acuerdo a lo descrito en la Norma “Práctica Normativa para Reducir las Muestras de Agregados a Tamaño de Prueba” (ASTM C702 / C702M - 11), véase Figura 3.8.



Figura 3.8 Reducción de Muestras de Material RAP.

La ejecución del ensayo granulométrico, se realiza con una variación del “Método De Prueba Estándar Para Análisis Granulométrico del material pétreo Finos y Gruesos” (ASTM C136 / C136M - 14). Este ensayo es realizado tanto al material pétreo como al material de RAP, véase Figura 3.9.



Figura 3.9 Tamices y Mallas para el ensayo Granulométrico.

3.2 GRANULOMETRÍA DE DISEÑO

Uno de los puntos fundamentales en el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado es el ajuste de la estructura granulométrica de mezcla de los materiales. La Figura 3.10, muestra los límites granulométricos requeridos para las bases estabilizadas con asfalto espumado. Este criterio generalmente define el máximo porcentaje de RAP a utilizar en la mezcla de materiales. La Tabla 3.3 presenta los límites granulométricos para abertura de malla.

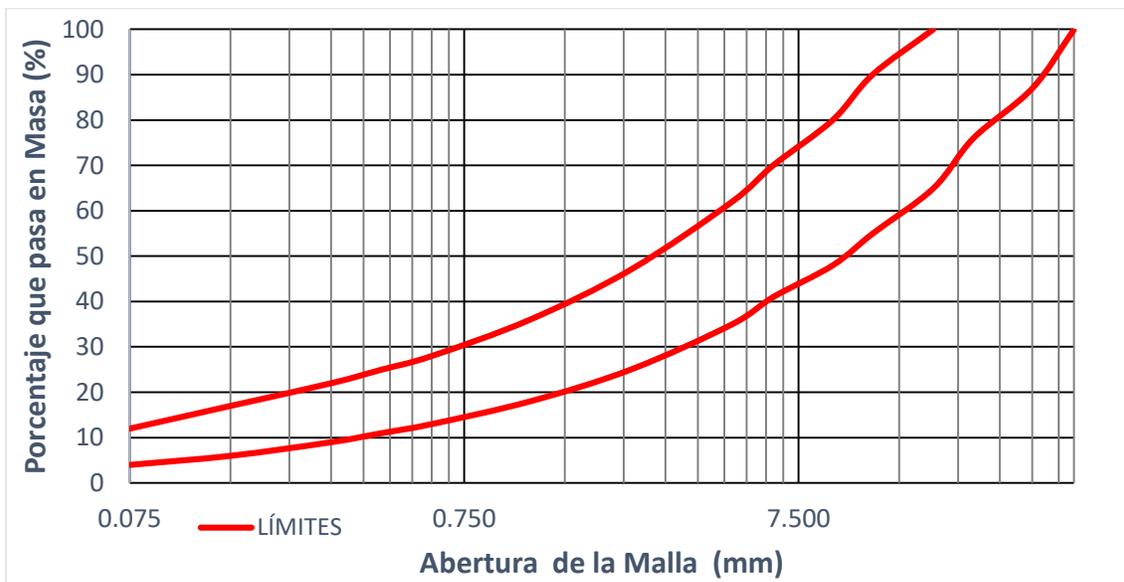


Figura 3.10 Límites Granulométricos para bases espumadas. Fuente: Wirtgen (2012)

Tabla 3.3 Valores límite para curvas granulométricas. Fuente: Wirtgen (2012)

ABERTURA DE MALLA		LÍMITE SUPERIOR (%)	LÍMITE INFERIOR (%)
IN.	mm		
2"	50.00	100	100
1 1/2"	37.50	100	87
1"	25.00	100	76
3/4"	19.00	100	65
1/2"	12.50	90	55
3/8"	9.50	80	48
1/4"	6.30	70	41
N°4	4.75	62	35
8	2.360	47	25
16	1.180	36	18
30	0.600	28	13
40	0.425	25	11
50	0.300	22	9
100	0.150	17	6
200	0.075	12	4

3.2.1 DENSIDAD SECA MÁXIMA

Una vez definida la granulometría de la mezcla de materiales se determina el Peso Volumétrico Seco Máximo (PVSM), conocido también como γ_d . Esta determinación se realiza mediante la norma SCT, M-MMP-1-09/06 (2006), variante "D". Este ensayo permitirá obtener dos parámetros de diseño los cuales son el contenido de humedad óptima y la densidad seca máxima. La compactación se realiza en cinco (5) capas, aplicando cincuenta y seis (56) golpes por capa, con un pisón de 4.54 kg en un molde de 152.4mm de diámetro interior, Figura 3.11.



Figura 3.11 Molde para variante tipo "D"

Para cada una de las mezclas se requiere elaborar cuatro puntos con diferentes contenidos de humedad, de los cuales se pretende tener dos puntos antes y dos puntos después del contenido de humedad óptima.

3.2.2 PROPORCIÓN REPRESENTATIVA

Uno de los criterios a tomar en consideración para la dosificación de la mezcla de materiales en laboratorio es el tamaño máximo del agregado. La metodología de diseño para asfalto espumado considera que sin importar el nivel del tránsito no se deben utilizar partículas mayores a 3/4". Las cuales deben de ser retiradas y compensadas con el material restante, generando una proporción representativa del material.

Para generar dicha proporción representativa, se requiere separar el material de la muestra en las siguientes fracciones:

- Retenido en la malla 19mm
- Pasa 19mm - Retenido 12.5 mm
- Pasa 12.5 mm- Retenido 4.75mm
- Pasa 4.75mm

Se sustituye la proporción retenida en la malla 19mm con material que pase la malla 19mm y es retenida en la malla 12.5mm. El ejemplo en la Tabla 3.4 explica el procedimiento:

Tabla 3.4 Elaboración de proporción representativa. Fuente: Wirtgen (2012)

ANALISIS DE MALLA		CANTIDAD DE MATERIAL A SER INCLUIDO POR CADA 10 KG DE MUESTRA		
TAMAÑO DE MALLA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA	PASA 19MM Y RETENIE EN 12.5	PASA 12.5 MM Y RETIENE EN 4.75MM	PASA 4.75 MM
19	90.5	$\left(\frac{100-72.3}{100} \times 10,000\right) = 2,770 \text{ g}$	$\left(\frac{72.3-53.6}{100} \times 10,000\right) = 1,870 \text{ g}$	$\left(\frac{53.6}{100} \times 10,000\right) = 5,360 \text{ g}$
12.5	72.3			
4.75	53.6			

3.3 PROPIEDADES ESPUMANTES DEL ASFALTO

Adicional a la caracterización del ligante asfáltico, se deben determinar las propiedades espumantes del mismo. Esta determinación se realiza en el equipo de Espumado de laboratorio WLB-10S (Figura 3.12). El proceso para realizar esta determinación se presenta en el diagrama de la Figura 3.13.



Figura 3.12 Equipo de Laboratorio Wirtgen WLB-10S.

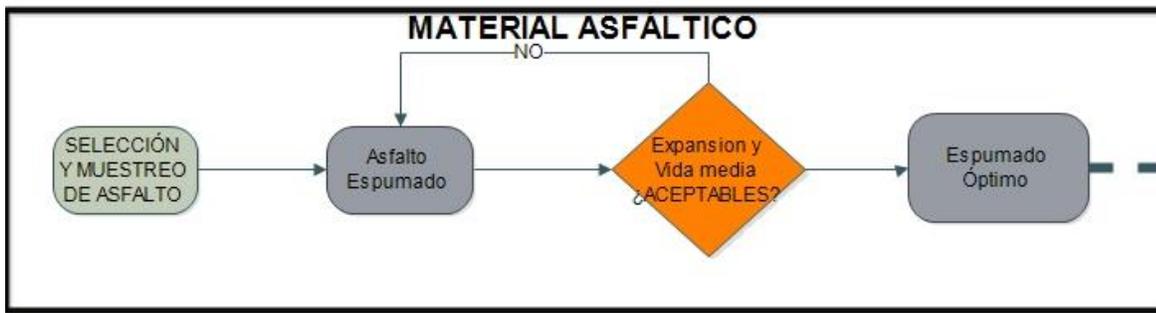


Figura 3.13 Diagrama de Flujo de análisis para el Material Asfáltico.

Las propiedades espumantes del asfalto Re y $\tau_{1/2}$ se determinan al utilizar un recipiente y una varilla estandarizada (véase Figura 3.14) pre-calentado a 75°C, dentro del cual, se procede a descargar el asfalto espumado.



Figura 3.14 Recipiente y varilla estandarizada para Medición de Expansión de asfalto espumado.

Posteriormente se analiza el volumen expandido y su consecuente colapso dentro del recipiente conforme transcurre el tiempo (véase la Figura 3.15).

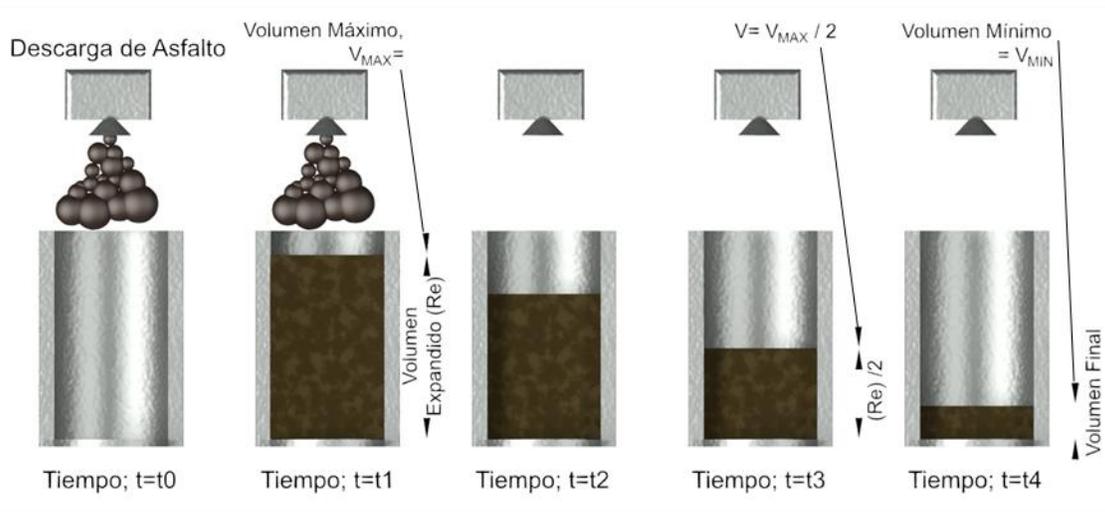


Figura 3.15 Medición de Propiedades Espumantes del Asfalto Espumado.

La descarga del asfalto se puede apreciar entre el tiempo $t=0$ y $t=1$, en el tiempo $t=2$ el asfalto espumado comienza a colapsar, y es hasta el tiempo $t=3$ cuando el volumen máximo se encuentra a la mitad, es decir es en ése momento que al registrar el tiempo es posible conocer la vida media $\tau_{1/2}$, posteriormente en el tiempo $t=4$ el volumen final de asfalto espumado ha colapsado por completo.

❖ RELACIÓN DE EXPANSIÓN (Re)

Una medida de la viscosidad del asfalto espumado, calculado como la proporción máxima del volumen de la espuma respecto del volumen original del asfalto.

❖ VIDA MEDIA. ($\tau_{1/2}$)

Una medida de la estabilidad del asfalto espumado, calculado como el tiempo tomado en segundos por la espuma en colapsar a la mitad de su volumen máximo.

Los parámetros mencionados anteriormente, se calculan a tres diferentes temperaturas sin exceder los 195° C, donde cada uno de ellos se realiza con tres diferentes contenidos de agua. Cabe mencionar que el equipo Wirtgen WLB-10S cuenta con un panel de control capaz de ajustar dicha temperatura. Así también dentro del mismo panel de control, se ingresa el porcentaje de agua a inyectar, el cual es convertido por el equipo en un caudal o columna de agua requerida según sea la velocidad de inyección del asfalto. A continuación dicha columna se ajusta manualmente en el medidor de flujo mediante una perilla mecánica, véase Figura 3.16.



Figura 3.16 Ajuste del Fluxómetro en el equipo WLB-30S

3.3.1 DETERMINACIÓN DE ESPUMADO ÓPTIMO

El criterio que se utiliza para seleccionar la mejor espuma obtenida, es seleccionar la mejor relación de expansión **Re**, con una mejor vida media $\tau_{1/2}$. Donde los parámetros de aceptación mínima se encuentran establecidos en el Manual (Wirtgen Cold Recycling Technology, 2012) son los que se muestran a continuación en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Límites mínimos para asfalto espumado. Fuente: Wirtgen (2012)

CARACTERÍSTICAS DE ASFALTO ESPUMADO (LÍMITES MÍNIMOS)		
TEMPERATURA DE AGREGADO	10°C -15° C	>15° C
RAZON DE EXPANSIÓN (VECES)	10	8
VIDA MEDIA (SEG)	8	6

Para encontrar entonces los valores de **Re** y $\tau_{1/2}$, se requiere realizar un barrido de por lo menos tres temperaturas (160° C, 170° C y 180° C), añadiéndose tres diferentes contenidos de agua (2%, 3% y 4%) a cada una de ellas, dichas temperaturas y contenidos de agua son recomendados por la literatura Wirtgen (2012)

3.4 DISEÑO DE LA MEZCLA DE MATERIALES (FÓRMULA DE TRABAJO)

La metodología para el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado considera tres niveles de diseño, los cuales están definidos de acuerdo con el tránsito al cual va estar sometido el pavimento asfáltico. Los cuales se describen a continuación:

Nivel I: Necesidad de filler activo.- El presente nivel de diseño tiene como objetivo establecer si la mezcla de materiales (Base hidráulica - RAP) necesita la inclusión de un filler activo. Para esta determinación se realizará un ensayo de susceptibilidad a la humedad mediante el ensayo de TSR (Tensile Strength Ratio por sus siglas en inglés) también conocido como Relación de Resistencia a la Tensión. Los dos filler activos

utilizados para este tipo de material es la cal y el cemento Portland en porcentajes de 1%. Por lo cual, se realiza una evaluación con cada una de las tres variables (Sin filler, 1% de cal y 1% de cemento).

Nivel II: Determinación del contenido de asfalto espumado.- En este nivel, se pretende determinar el contenido óptimo de asfalto espumado que requiere el material. Una vez seleccionada una de las tres variantes analizadas en el Nivel I, se realiza un barrido de contenidos de asfalto espumado (4 porcentajes), determinando el mejor desempeño mediante el ensayo de susceptibilidad a la humedad. Los rangos de contenido de asfalto espumado varían de acuerdo a los materiales, porcentaje de RAP y características de compactación de las mezcla de materiales. En general, los contenidos se encuentran en el rango de 2.0% a 3.0%. Después de esta evaluación se tendrá determinada la mezcla de materiales (fórmula de trabajo)

Nivel III: Propiedades mecánicas.- Este Nivel tiene como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla de materiales definida en los dos niveles previos. Los parámetros a evaluar son el valor de cohesión y el Ángulo de fricción interna, los cuales serán determinados mediante un ensayo de triaxial.

INDICADOR DE DISEÑO ESTRUCTURAL: Con el objetivo de incorporar los resultados obtenidos a un método de diseño estructural de pavimentos, se propone la incorporación de una evaluación adicional, la cual nos permita obtener un indicador de la capacidad estructural de la nueva base estabilizada. Para ello se decidió seleccionar el ensayo de módulo de resiliencia, el cual es el parámetro más utilizado en el diseño de pavimentos. La Figura 5.17 presenta un esquema de la evaluación de los diferentes niveles de diseño propuestos y el nivel de tránsito considerado para cada nivel.

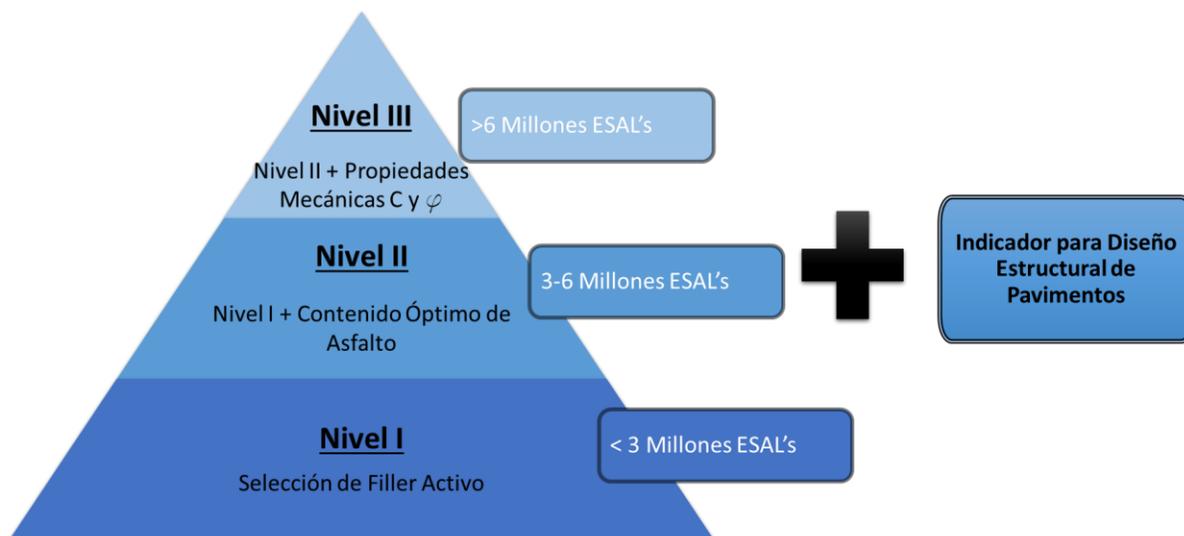


Figura 3.17 Propuesta de los diferentes Niveles de Diseño para una Base Estabilizada con Asfalto Espumado en México.

3.4.1 NIVEL I.- FILLER ACTIVO

El primer punto a verificar es el resultado del ensayo de límites de Atterberg de acuerdo con la **Tabla 3.2**, por lo cual si el IP es menor a 10, solo se realizarán los ensayos con los filler seleccionados (cal – cemento) y no será necesario hacer la evaluación de la mezcla sin filler.

Para determinar cuál Filler activo es el indicado, se elaboran especímenes de 100mm de diámetro y 65mm de altura, los cuales son sometidos a los ensayos de ITS con el propósito de conocer el valor TSR. Para ello se requieren elaborar 6 especímenes para cada tipo de Filler a analizar, siendo 3 de ellos para condición seca y 3 para condición húmeda, todos a su vez incluyendo un mismo porcentaje de asfalto espumado inicial, el cual es posible estimar a partir de la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Estimación Inicial de Asfalto Espumado. Fuente Wirtgen (2012).

FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA 0.075mm (%)	ADICIÓN DE ASFALTO ESPUMADO (% DE MASA DEL AGREGADO SECO)		TIPO DE MATERIAL TÍPICO
	FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA 4.75mm		
	<50%	>50%	
<4	2.0	2.0	ASFALTO RECICLADO (RAP)
4-7	2.2	2.4	RAP/GRAVA TRITURADA/ GRAVA NATURAL/MEZCLAS
7-10	2.4	2.8	
>10	2.6	3.2	GRAVAS/ARENAS

Actualmente las pruebas ITS (*Indirect Tensile Strength* por sus siglas en inglés), son utilizadas para conocer el esfuerzo máximo admisible antes producirse una grieta o falla en los asfaltos espumados. Dichas pruebas también se realizan para determinar el daño potencial que pudiera suscitarse ante la presencia de humedad en campo.

El procedimiento que se requiere para ejecutar dicho Nivel I puede ser representado mediante el siguiente diagrama mostrado en la Figura 3.18, el cual es detallado en los apartados posteriores.



Figura 3.18 Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de Especímenes Nivel I.

3.4.1.1 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES/DENSIFICACIÓN

Para iniciar el proceso de estabilización con asfalto espumado, se requiere introducir el material a estabilizar en la mezcladora Wirtgen WLM30 (Figura 3.19) junto con la cantidad requerida de filler (en caso de ser necesario), estos materiales se mezclan uniformemente en la revolvedora durante un minuto. Posteriormente, se enciende de

nuevo el equipo añadiendo simultáneamente el agua necesaria para alcanzar el 75% de humedad óptima. Una vez terminado de añadir el agua al 75% de su contenido óptimo, se acciona por última vez la mezcladora para poder así inyectar espumado requerida para la cantidad de material, y por último se añade el 25% de agua restante. Siendo que el agua durante el mezclado es necesaria para una adecuada dispersión en el agregado tal lo menciona Fu, Jones, Harvey, & Bukhari (2010).



Figura 3.19 Equipo Mezclador de Doble Eje Wirtgen WLM-30.

Para densificar el material una vez espumado, usualmente se utiliza la compactación manual (M-MMP-1-09/06, 2006) ó compactación Marshall, ya que ésta se pueden llevar a cabo prácticamente en cualquier laboratorio a nivel internacional. Sin embargo pueden ser utilizados otros procedimientos como lo son:

- a. Compactador Giratorio
- b. Martillo Vibratorio
- c. Mesa Vibratoria

Todos los procesos de densificación mostrados anteriormente son válidos siempre y cuando, se logre alcanzar la densidad requerida es decir el 100% de compactación, a continuación se muestra una tabla con las características de diámetro y altura del espécimen respecto a su Nivel de Diseño I, véase la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Características de los especímenes Nivel I. Fuente: Wirtgen (2012)

DIAMETRO DEL ESPÉCIMEN	ALTURA DEL ESPÉCIMEN	NIVEL DE DISEÑO
100 mm	63.5 mm	Nivel I

Para fines de la presente investigación se opta se utilizó el equipo compactador Giratorio (Figura 3.20).



Figura 3.20 Compactador Giratorio SERVOPAC. Propiedad del IMT.

Es importante señalar que la configuración utilizada para la compactación de probetas en la presente investigación es de 600KPa y 1.25° grados de giros, a 30 RPM. Por lo que el número de giros de la compactación se detenía al alcanzar los 63.5 ó 95mm de altura según sea el Nivel de diseño, es decir se tomó la cantidad de material requerido en función del Peso Volumétrico Húmedo Máximo. A continuación se presentan los especímenes de 4" después de haber sido compactados mediante el compactador giratorio, véase Figura 3.21.



Figura 3.21 Especímenes Nivel I Compactados Mediante el Compactador Giratorio.

3.4.1.2 PROCEDIMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO.

El procedimiento de curado que se aplica para el Nivel de Diseño I, tiene como objetivo simular la condición de campo, así como la humedad más desfavorable del material sometido a campo. El primero de ellos es un procedimiento estándar para secar las muestras a masa constante denominado ITS_{SECO} . Para el segundo acondicionamiento de Nivel I, se parte de realizar el mismo procedimiento de ITS_{SECO} para posteriormente sumergir el espécimen en agua a 25°C durante 24 hrs, este proceso de curado se le designa $ITS_{SATURADO}$. Para fines de terminología y proceso de acondicionamiento más detallado se anexa la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Procedimiento de acondicionamiento para ITS Nivel I. Fuente: Wirtgen (2012)

TERMINOLOGÍA	DIAMETRO DE ESPÉCIMEN	REGIMEN DE CURADO	CONTENIDO DE HUMEDAD	DISEÑO
ITS_{SECO}	100 mm	72 hrs no selladas (40°C)	<1%	Nivel I
$ITS_{SATURADO}$		SECO + 24 hrs sumergidas (25°C)	Saturadas	

Para una mejor comprensión de la tabla anterior se anexa la Figura 3.22 y Figura 3.23 donde se muestran los diferentes acondicionamientos de ITS Nivel I.



Figura 3.22 Especímenes ITS_{SECO} .



Figura 3.23 Especímenes $ITS_{SATURADO}$.

Cabe señalar que al realizar el procedimiento de acondicionamiento para ITS, se requiere preparar previamente los especímenes para su posterior ensayo, dicha preparación consta de calcular la densidad aparente del espécimen (DA), la cual se realiza mediante la Ecuación 9. Las mediciones para el Nivel I (véase Figura 3.24) se deben de realizar al cumplir las 72 horas dentro del horno, sin embargo los especímenes deben de pesarse antes de sumergirse en agua.

$$DA_{spec} = \left(\frac{4 \times M_{spec}}{\pi \times d^2 \times h} \right) \times 1'000,000 \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

$$DA_{spec} = \text{Densidad aparente} \quad [\text{Kg/m}^3]$$

M_{spec} = Masa del espécimen	[g]
h= Altura promedio del espécimen	[mm]
d= Diámetro del espécimen.	[mm]



Figura 3.24 Mediciones de especímenes para ITS.

Para determinar dicho esfuerzo máximo admisible, se determina la última carga medida antes de la falla, la cual es aplicada sobre el diámetro de la probeta (véase Figura 3.25) a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm/min, para conocer dicho valor se utiliza la Ecuación 10. Cabe mencionar también que, se requiere tener control preciso en la temperatura ($25^{\circ}\text{C} \pm 2.0^{\circ}\text{C}$) de los especímenes al momento del ensaye. Es decir, para el caso de las probetas ITS_{SECO} se requieren aclimatar después de haberse sacado del horno, mientras que para las probetas ITS_{SATURADO} se requiere verificar que la temperatura del agua se mantenga constante, y posteriormente secar las mismas superficialmente.



Figura 3.25 Ensayo de pruebas ITS.

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta.	[KPa]
P = Carga máxima aplicada	[KN]
h = Altura promedio del espécimen	[KN]
d = Diámetro del espécimen	[KN]

Se realizan entonces los ensayos de ITS_{SECO} e $ITS_{SATURADO}$, para posteriormente obtener el valor (TSR) *Tensile Strength Ratio* por sus siglas en inglés. La cual es la relación entre el promedio de los valores de $ITS_{SATURADO}$ dividido entre los valores de ITS_{SECO} para un grupo específico de especímenes, expresado en porcentaje mediante la Ecuación 11.

$$TSR = \frac{Prom\ ITS_{SATURADO}}{Prom\ ITS_{SECO}} \times 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

Prom $ITS_{SATURADO}$ = Valores ITS Saturados Promedio	[KPa]
Prom ITS_{SECO} = Valores ITS Secos Promedio	[KPa]

3.4.1.3 SELECCIÓN DE FILLER ACTIVO

Para la selección del filler activo se tienen que realizar dos evaluaciones de resultados. La primera es la resistencia de las probetas en condición seca y húmeda. Para esto, las probetas evaluadas deberán cumplir los valores mínimos presentados en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Características Mínimas de aceptación para los especímenes Nivel I

PRUEBA	DIÁMETRO DE ESPÉCIMEN	KPa
ITS_{SECO}	100MM	>225
$ITS_{SATURADO}$	100MM	>100

El segundo criterio es la relación de TSR, el cual se describe a continuación:

NO FILLER - Cuando la mezcla sin filler obtenga un valor $TSR > 60\%$.

FILLER – Cuando la mezcla sin filler obtenga un valor $TSR < 60\%$. Se utiliza entonces la mezcla con filler que logre un $\Delta > 5\%$ respecto a la otra mezcla. En caso de que la diferencia de ambos sea $< 5\%$, cualquiera de ambos filler propuestos es el adecuado.

3.4.2 NIVEL II.- CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO ESPUMADO

Una vez seleccionado el Filler activo que brinda el con mejor desempeño en la mezcla, se procede a optimizar el contenido óptimo de asfalto espumado, partiendo con el punto inicial indicado anteriormente en la **Tabla 3.5**, posteriormente se ajusta valores por encima y por debajo del punto analizado, regularmente en incrementos de 0.2%.

El ensayo a realizar en el Nivel II, es similar al ensayo de la prueba en el Nivel I, debido a que se requiere conocer el esfuerzo máximo admisible antes producirse una grieta o falla en los asfaltos espumados, siendo que en éste Nivel II se evalúa la influencia del contenido de asfalto espumado y la evaluación se realiza en probetas con dimensiones diferentes a las del Nivel I. El proceso puede se presenta en la Figura 3.26.



Figura 3.26 Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de Especímenes Nivel II.

3.4.2.1 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES/DENSIFICACIÓN

La diferencia con respecto al nivel anterior son las dimensiones de los especímenes de ensayo. Las dimensiones se presentan en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Características de los especímenes Nivel II. Fuente: Wirtgen (2012)

DIAMETRO DEL ESPÉCIMEN	ALTURA DEL ESPÉCIMEN	NIVEL DE DISEÑO
150 mm	95.0 mm	Nivel II

3.4.2.2 PROCEDIMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO.

El procedimiento de curado para especímenes de Nivel II tiene como objetivo simular las condiciones de campo, donde el "Contenido de Humedad de Equilibrio" el cual es aproximadamente el 50% del Contenido de Humedad Óptimo, a éste proceso de deshidratación controlado se le denomina $ITS_{EQUILIBRIO}$. Para el cuarto acondicionamiento de humedad, se realiza el proceso de $ITS_{EQUILIBRIO}$ y posteriormente se sumerge en agua durante 24 hrs a 25°C, dicho proceso tiene el nombre de $ITS_{EQUI-SATURADO}$. Para fines de terminología y proceso de curado más detallado se anexa la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Procedimiento de Curado para ITS Nivel II. Fuente: Wirtgen (2012)

TERMINOLOGÍA	DIÁMETRO DE ESPÉCIMEN	RÉGIMEN DE CURADO	CONTENIDO DE HUMEDAD	DISEÑO
$ITS_{EQUILIBRIO}$	150 mm	24 hrs no selladas (40°C) + 48 hrs en bolsa sellada (40°C)	+/- 50% del Contenido de Humedad Óptima	Nivel II
$ITS_{EQUI-SATURADO}$		EQUIL +24 hrs sumergidas (25°C)	Semi-Saturadas	

Para conocer el valor de ITS de las probetas de Nivel II, al igual que en el caso anterior (Nivel I), el ensayo se realiza después de que las probetas han concluido su acondicionamiento y se ha calculado su DA; Es decir, la mitad de ellas son ensayadas después de cumplir su régimen de curado en horno (24 hrs. no selladas + 48 hrs. selladas) véase Figura 3.27, y la mitad restante se acondiciona sumergidas en agua durante 24 horas a una temperatura de 25°C (véase Figura 3.28)



Figura 3.27 Proceso de Acondicionamiento $ITS_{EQUILIBRIO}$.



Figura 3.28 Proceso de Acondicionamiento $ITS_{EQUI-SAT}$

3.4.2.3 SELECCIÓN ÓPTIMA DE ASFALTO ESPUMADO

La forma de evaluar la influencia del contenido de asfalto espumado es similar a la realizada en el Nivel I. La única diferencia radica en los valores de resistencia que deben cumplir los especímenes en condición seca y húmeda, los cuales se presentan en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Parámetros mínimos de Diseño Nivel II. Fuente: Wirtgen (2012).

PRUEBA	DIÁMETRO DE ESPÉCIMEN	KPa
ITS _{EQUILIBRIO}	150MM	>175
ITS _{EQUI-SATURADO}	150MM	>100

3.4.3 NIVEL III.- DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS

Una vez determinada la mezcla de materiales de diseño (tipo de filler activo y el contenido óptimo de asfalto espumado), se requiere evaluar las propiedades mecánicas de esta fórmula de trabajo, la cual se realiza mediante una serie de ensayos triaxiales propuestos por Mulusa (2009). Entiéndase como prueba triaxial (Figura 3.29), una prueba en donde los esfuerzos son medidos en tres direcciones mutuamente perpendiculares, tal lo menciona el DOT del estado de Texas (TXDOT, 2002), siendo así una metodología para evaluar el comportamiento de los MEA.

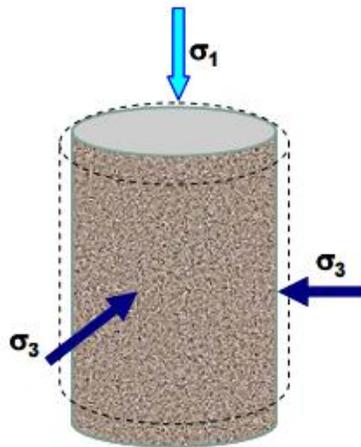


Figura 3.29 Principio de una prueba triaxial. Fuente: Mulusa (2009).

Por medio de estos ensayos es posible conocer los parámetros de cohesión y fricción del nuevo material estabilizado, debido a la teoría de Mohr-Coulomb, los cuales pueden ser ejemplificados a través de la siguiente ecuación.

$$\tau_f = C + \sigma \tan \varphi$$

Ecuación 12

Dónde:

τ_f = Esfuerzo cortante

C = Cohesión

σ = Esfuerzo normal actuando en el plano de falla

φ = Ángulo de Fricción interna

Así mismo puede ser graficado para obtener los valores de C y φ , véase Figura 3.30.

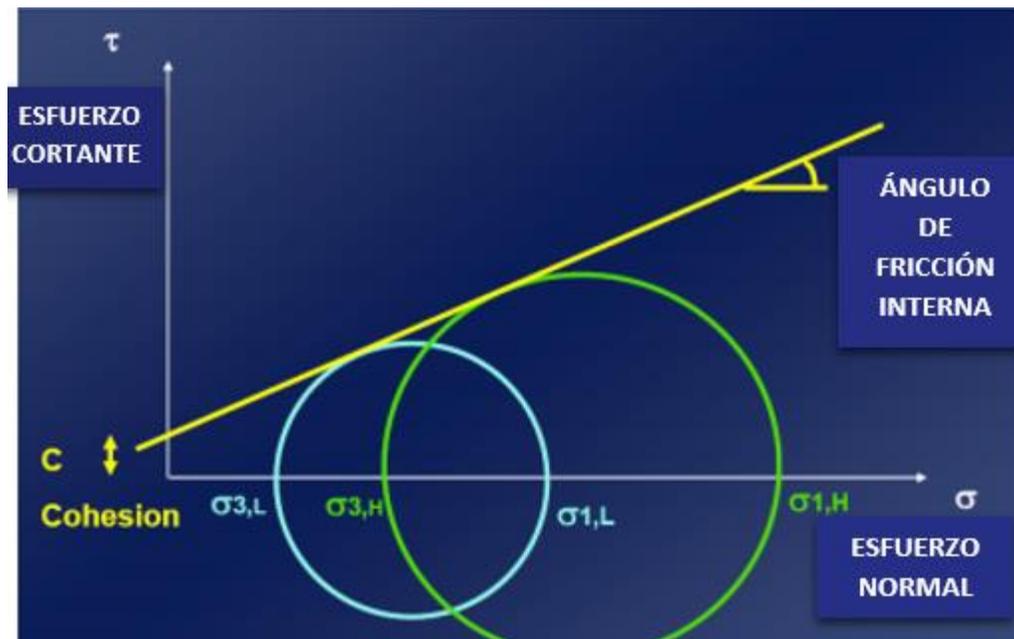


Figura 3.30 Gráfica Mohr-Coulomb de pruebas triaxiales monotónicas. Fuente: Jenkins (2008).

La ejecución de la prueba se lleva a cabo a una temperatura ambiente de 25°C, utilizando 4 diferentes presiones de confinamiento (0, 50, 100, 200 KPa) y a una velocidad de aplicación de carga constante (0.3 mm/s). Por lo que se requiere elaborar la menos 8 especímenes para esta prueba triaxial, las dimensiones de los especímenes son 150mm de Diámetro, y 300mm de Altura. La condición de humedad a utilizar en las pruebas triaxiales, es el 50% de la humedad óptima de la mezcla, dicha humedad se alcanza entre 48-72hrs después de la fabricación de los especímenes de ensayo, véase Figura 3.31.



Figura 3.31 Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de Especímenes Nivel III.

3.4.3.1 ELABORACIÓN DE ESPÉCIMENES/DENSIFICACIÓN

La elaboración de Especímenes Nivel III, utiliza la energía de compactación manual (NCHRP, 2004). Las dimensiones requeridas para el presente nivel se muestran a continuación en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 Características de los especímenes según su nivel de diseño. Fuente: Wirtgen (2012)

TAMAÑO DEL ESPÉCIMEN Y ESFUERZO DE COMPACTACIÓN APLICADO EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN			
DIÁMETRO DEL ESPÉCIMEN	ALTURA DEL ESPÉCIMEN	ENERGÍA DE COMPACTACIÓN	NIVEL DE DISEÑO
150 mm	300 mm	NCHRP, 1-28A	Nivel III

Con lo que una vez preparado el material estabilizado con asfalto espumado y con su correspondiente humedad óptima, se procede a utilizar el documento NCHRP 1-28A. En la cual menciona las características del molde a utilizar para elaborar los especímenes (Figura 3.32), por lo cual se procede a utilizar un molde de 150 mm de diámetro interior y 300 mm de altura efectiva (sin collarín), el cual es desmontable de la base y separable por la mitad para poder así extraer el espécimen elaborado sin dañarlo, véase Figura 3.33.

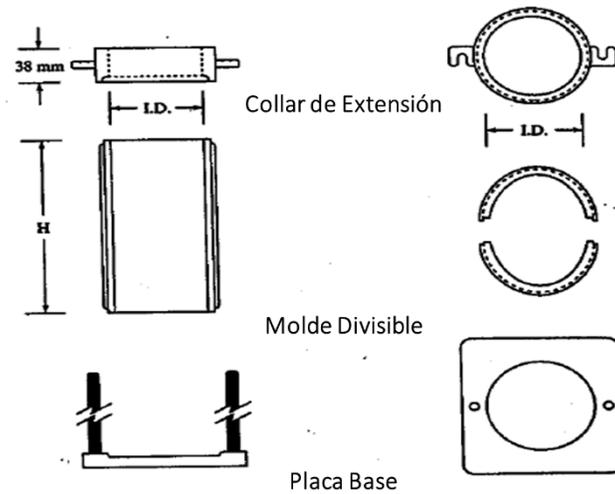


Figura 3.32 Características del Molde para elaboración de especímenes. Fuente: NCHRP Project 1-28A (2004)



Figura 3.33 Molde para elaboración de especímenes

La energía de compactación a utilizar es de 56,000 ft-lbf/ft³ realizados mediante la compactación manual de 56 golpes con un martillo de 10 libras y una altura de caída de 18 pulgadas en 9 capas. Así también, se realiza el cálculo para obtener la cantidad de material requerido en su humedad óptima dentro del molde, lo anterior es a partir de considerar el volumen del mismo contemplando una altura adicional de 5 mm sobre el ras efectivo, esto con el propósito de que el material rebase el molde, para posteriormente ser posible enrasar el espécimen. De esta manera es posible determinar la cantidad de suelo

húmedo a compactar dentro del molde para alcanzar el peso volumétrico deseado (densificación), y mediante la Ecuación 13 presentada a continuación poder calcular el peso de material por capa.

$$W_{\text{capa}} = \frac{\text{Peso total del espécimen}}{\text{número de capas}} \qquad \text{Ecuación 13}$$

Posteriormente se realizan los cuarteos necesarios para disminución de muestras, y se dosifica el material requerido por capa, posteriormente se realiza la compactación de la primera capa, verificando la correcta ejecución de la misma, así como la velocidad de aplicación de los impactos sea constante. Posteriormente se realiza un escarificado después de la compactación y previo a la compactación de las capas subsecuentes. Una vez completada la compactación del espécimen se procede a enrasar la parte superior del mismo, y posteriormente se desacopla el molde (Figura 3.34).



Figura 3.34 Compactación, Enrasado y desacoplamiento del molde.

Posteriormente se procede a registrar el peso del espécimen con el propósito de verificar la densificación requerida (Figura 3.35).



Figura 3.35 Pesado de espécimen.

3.4.3.2 PROCEDIMIENTO DE ACONDICIONAMIENTO

El procedimiento de curado para especímenes se anexa la Tabla 3.14. En la cual, se muestra el proceso a seguir para alcanzar dicha humedad. La muestra elaborada se somete a un curado de 24 horas en un horno a 40° C, para posteriormente ingresar el espécimen dentro de una bolsa sellada a 40°C (

Figura 3.36).

Tabla 3.14 Procedimiento de Curado para ITS Nivel III. Fuente: Wirtgen (2012)

TERMINOLOGÍA	DIÁMETRO DE ESPÉCIMEN	RÉGIMEN DE CURADO	CONTENIDO DE HUMEDAD	DISEÑO
TRIAXIALEQUILIBRIO	150 mm	24 hrs no selladas (40°c) + 48 hrs en bolsa sellada (40°c)	+/- 50% del Contenido de Humedad Óptima	Nivel III



Figura 3.36 Proceso de curado de los especímenes.

Para lograr realizar la prueba a diferentes presiones de confinamiento, se utiliza una membrana de látex alrededor del espécimen (véase Figura 3.37) dentro de una carcasa desmontable. Posteriormente, mediante un compresor de aire y un manómetro, se regula la presión de la membrana para el posterior ensayo de la misma (Figura 3.38).



Figura 3.37 Colocación de la Membrana de Látex en el espécimen triaxial.



Figura 3.38 Regulación de la presión de confinamiento en la membrana.

Una vez estabilizada y verificada la presión de confinamiento requerida se comienza a ejecutar el ensayo mediante el equipo de cómputo, véase Figura 3.40.



Figura 3.39 Montaje e Inicialización de la Prueba triaxial.

Los valores mínimos requeridos para la clasificación de los Materiales Estabilizados con Asfalto (MEA) son los parámetros que se muestran en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15 Parámetros mínimos de diseño para el Nivel III. Fuente: Wirtgen (2012)

PRUEBA Ó INDICADOR	MEA 1
Cohesión (KPA) [kg/cm ²]	>250 [2.55]
Ángulo De Fricción (°)	>40°

3.5 INDICADOR PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

La evaluación de la capacidad estructural de la mezcla de materiales se realizará mediante el ensayo de módulo de resiliencia. Esta evaluación tiene como objetivo el incorporar los resultados obtenidos a un método de diseño estructural de pavimentos.

3.5.1 INSTRUMENTACIÓN DE LA PRUEBA DE MÓDULO DE RESILIENCIA

Para llevar a cabo la prueba de Módulo de Resiliente, se utiliza el equipo triaxial cíclico. Dicho equipo está compuesto por tres unidades elementales:

1. Unidad de Registro de Información.- Esta unidad es un sistema computarizado la cual permite realizar las pruebas y ajustar los parámetros de secuencia y

confinamiento, además de poder registrar la información proveniente de las otras dos unidades, (Figura 3.40.a).

2. Unidad Reguladora de Presión.- Dicha unidad cuenta con una válvula reguladora de presiones de confinamiento, la cual es controlada electrónicamente, con la posibilidad de ajustar manualmente, (Figura 3.40.b)
3. Unidad de Aplicación de Carga.- El marco de aplicación de carga para especímenes de suelos friccionantes cuenta con dos LVDT's, Linear Variable Differential Transformers por sus siglas en inglés. Dispositivos encargados de transmitir la magnitud de las deformaciones a la unidad de registro. Además el marco cuenta con un pistón hidráulico el cual es regulado dependiendo de los ciclos de cargas requeridos. En dicho marco es colocada la cámara de confinamiento, así como la probeta a ensayar, (Figura 3.40.c)



(a) (b) (c)
Figura 3.40 Equipo de Laboratorio para Módulo de Resiliente.

A continuación en la Figura 3.41, se anexa un esquema de la instalación de la cámara triaxial y sus componentes.

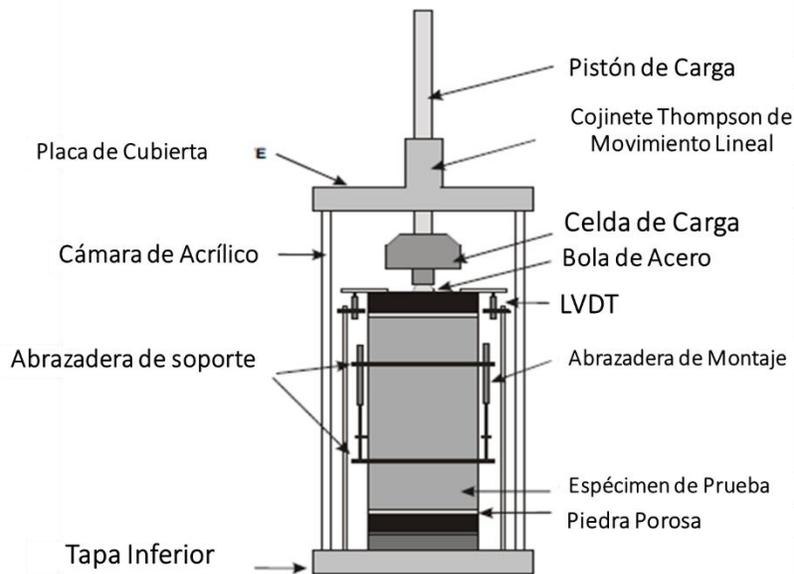


Figura 3.41 Esquema de los componentes de la cámara triaxial. Fuente: NCHRP Project 1-28A (2004)

3.5.2 ENSAYO DE LA PRUEBA MÓDULO DE RESILIENTE

Tal como se mencionó en la sección de elaboración de especímenes y tomando como referencia la publicación “Project 1-28^a” (NCHRP, 2004), se procede a preparar el equipo para realizar la prueba:

1. Previo a la colocación de la probeta se requiere introducir las secuencias a analizar en la prueba, en este caso se introduce la secuencia para una base granular tal lo muestra la Tabla 3.16.
2. Se coloca una piedra porosa y un papel filtro sobre el cabezal inferior.
3. Sobre de los anteriores se coloca el espécimen a ensayar, y sobre su parte superior se coloca otro papel filtro y otra piedra porosa. Tal se aprecia en Figura 3.42.

Tabla 3.16 Secuencia de ensayo para una Base Granular. Fuente: NCHRP (2004)

No. de Secuencia	Presión de Confinamiento s_3 (KPa)		Presión de Contacto		Esfuerzo Axial Cíclico		Esfuerzo Desviador Máximo		Repeticiones
	KPa	psi	KPa	psi	KPa	psi	KPa	psi	
0	103.5	15	20.7	3	207	30	227.7	33	1000
1	20.7	3	4.1	0.6	10.4	1.5	14.5	2.1	100
2	41.4	6	8.3	1.2	20.7	3	29	4.2	100
3	69	10	13.8	2	34.5	5	48.3	7	100
4	103.5	15	20.7	3	51.8	7.5	72.5	10.5	100
5	138	20	27.6	4	69	10	96.6	14	100
6	20.7	3	4.1	0.6	20.7	3	24.8	3.6	100
7	41.4	6	8.3	1.2	41.4	6	49.7	7.2	100
8	69	10	13.8	2	69	10	82.8	12	100
9	103.5	15	20.7	3	103.5	15	124.2	18	100
10	138	20	27.6	4	138	20	165.6	24	100
11	20.7	3	4.1	0.6	41.4	6	45.5	6.6	100
12	41.4	6	8.3	1.2	82.8	12	91.1	13.2	100
13	69	10	13.8	2	138	20	151.8	22	100
14	103.5	15	20.7	3	207	30	227.7	33	100
15	138	20	27.6	4	276	40	303.6	44	100
16	20.7	3	4.1	0.6	62.1	9	66.2	9.6	100
17	41.4	6	8.3	1.2	124.2	18	132.5	19.2	100
18	69	10	13.8	2	207	30	220.8	32	100
19	103.5	15	20.7	3	310.5	45	331.2	48	100
20	138	20	27.6	4	414	60	441.6	64	100
21	20.7	3	4.1	0.6	103.5	15	107.6	15.6	100
22	41.4	6	8.3	1.2	207	30	215.3	31.2	100
23	69	10	13.8	2	345	50	358.8	52	100
24	103.5	15	20.7	3	517.5	75	538.2	78	100
25	138	20	27.6	4	690	100	717.6	104	100
26	20.7	3	4.1	0.6	144.9	21	149	21.6	100
27	41.4	6	8.3	1.2	289.8	42	298.1	43.2	100
28	69	10	13.8	2	483	70	496.8	72	100
29	103.5	15	20.7	3	724.5	105	745.2	108	100
30	138	20	27.6	4	966	140	993.6	144	100



Figura 3.42 Colocación de Probeta sobre la piedra porosa.

4. Consecutivamente se coloca una membrana de látex sobre la probeta, con el propósito de evitar la pérdida de humedad de la misma en el transcurso de la prueba, véase Figura 3.43.



Figura 3.43 Colocación de Membrana de látex.

5. Posterior a la colocación de la membrana se coloca la cámara de acrílico, y es fijada por medio de unos tornillos en la tapa superior e inferior.



Figura 3.44 Colocación de cámara de acrílico.

6. Se enrosca la celda de carga con el pistón de carga.
7. Posteriormente son colocados los LVDT's y calibrados para establecer el nivel cero desplazamiento (deformación).
8. Se conectan los sensores a la unidad de registro, se anexa imagen del ensamble final dela probeta en el equipo triaxial cíclico.



Figura 3.45 Ensamblaje final sobre el marco de carga.

Debido a que la unidad de control lleva a cabo todo el proceso de ejecución de la prueba, no se requiere la manipulación de la misma, ya que es un proceso automatizado, sin embargo, se recomienda encontrarse al pendiente de la misma, debido a que suele suceder interrupción de la misma por falta de comunicación o pérdida de corriente eléctrica. Se anexa una fotografía de la interfaz de monitoreo, donde se lleva a cabo la carga del ciclo de la misma, véase Figura 3.46.

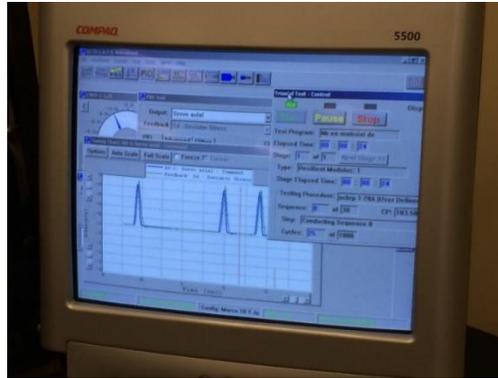


Figura 3.46 Interfaz de ejecución de prueba.

Una vez concluido el ensaye, es posible retirar los especímenes una vez descargada la cámara triaxial, primeramente se procede a desmontar la cámara, y posteriormente a remover la membrana de látex. A continuación se muestran algunos de los especímenes ensayados, tal se muestran en la Figura 3.47.



Figura 3.47 Especímenes ensayados para obtención de M_R .

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se reportan los resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita en el capítulo 3, para la caracterización de los materiales a utilizar, obtener una fórmula de diseño, y por último realizar la evaluación mecánica de la mezcla diseñada.

Se describen las diferentes consideraciones tomadas durante el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado, así como los diferentes comportamientos mecánicos observados durante la ejecución de los ensayos de laboratorio.

El diseño fue realizado para la rehabilitación de la autopista Cuernavaca-Acapulco, en el tramo del KM 114+800 al 136+000. Este proyecto consideró dos opciones de material reciclado las cuales fueron: un material 100% RAP (fresado de carpeta) y un material recuperado combinado (50% RAP y 50% Base Existente). Adicionalmente se utilizaron dos materiales de Banco con calidad de base hidráulica proveniente del Banco “Ahuatzingo” en el Estado de México.

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ASFÁLTICO

El material asfáltico utilizado en el estudio fue un AC-20 proveniente de la refinería de Salamanca en el estado de Guanajuato. La caracterización del material asfáltico se realizó por medio de la metodología SUPERPAVE Grado PG. El concentrado de resultados obtenidos se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resultados de Calidad del material asfáltico analizado (Grado PG).

Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Viscosidad	ASTM D4402-13	135 °C	η	0.477 Pa·s	≤ 3 Pa·s
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-08	64 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	1.80 kPa	≥ 1 kPa
Envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.519 %	$\leq 1.0\%$
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-08	64 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	9.38 kPa	≥ 2.2 kPa
Envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-08					
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-08	22 °C	$G^*(\text{sen}\delta)$	3881 kPa	$\leq 5,000$ kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S	66.7 MPa	≤ 300 MPa
			m	0.331	≥ 0.300

En esta evaluación el asfalto se clasificó como un PG 64 -16, tal lo muestra la Tabla 4.2, lo cual indica que es un asfalto adecuado para su utilización en el proceso de espumado, ya que no presenta una viscosidad alta, ni contiene un polímero que modifique sus propiedades reológicas.

Tabla 4.2 Grado PG del Asfalto Analizado.

Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:

PG 64 - 16

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO Y RAP

La caracterización del material pétreo y RAP se realizó mediante los ensayos de límites de consistencia, granulometría. Los resultados obtenidos en los dos materiales recuperados se presentan en la Tabla 4.3. El material RAP muestra un Limite Líquido de 27.7%, sin embargo el limite Plástico para este material es inapreciable, lo anterior debido a que el material fino obtenido después de cribar el material por la malla 40, no permitió completar el ensayo (Formación de rollo). En cuanto al material de RAP + BASE, presentó un Limite Líquido de 23.6%, obteniendo así un valor de Índice Plástico de 5.2%. De acuerdo a la especificación establecida para este ensayo (Tabla 3.2), el material no necesita un pre-tratamiento inicial (adición de cal).

En cuanto al material de aporte (base hidráulica), los valores Limite Líquido fueron inapreciables debido a la baja cantidad de material que pasa por la malla No. 40. Por lo cual, ninguno de estos materiales necesita un pre-tratamiento inicial.

Tabla 4.3 Resultados Plásticos de los Materiales Analizados

	RAP	RAP + BASE	Base ¾"	Base 1-½"
LÍMITE LÍQUIDO %	27.7	23.6	NP	NP
LÍMITE PLÁSTICO %	NP	18.4	NP	NP
ÍNDICE PLÁSTICO %	NP	5.2	NP	NP

Las granulometrías de los cuatro materiales son presentadas en la **Tabla 4.4**, la cual se muestra a continuación.

Tabla 4.4 Análisis Granulométrico del porcentaje que pasa de los materiales utilizados

ABERTURA DE MALLA		RAP	RAP+BASE	VIRGEN 3/4"	VIRGEN 1-1/2"
IN.	mm				
2"	50.00	100	100	100	100
1 1/2"	37.50	100	100	100	100
1"	25.00	93	98	100	40
3/4"	19.00	79	97	100	6
1/2"	12.50	62	90	80	1
3/8"	9.50	55	82	52	0
1/4"	6.30	47	64	21	0
N°4	4.75	40	58	9	0
8	2.360	30	38	0	0
16	1.180	20	24	0	0
30	0.600	15	16	0	0
40	0.425	13	13	0	0
50	0.300	11	11	0	0
100	0.150	7	8	0	0
200	0.075	1	6	0	0

La Figura 4.1 presenta la distribución granulométrica de los cuatro materiales evaluados en una gráfica semi-logarítmica. Se observa que la curva del Material RAP muestra una menor cantidad de finos comparado con la curva RAP + BASE Recuperada. Ninguno de los materiales recuperados cumple completamente con las especificaciones establecidas en la metodología; el material Rap + Base intersecta al límite superior, es decir, el material se encuentra fuera de rango (valores entre la malla ¼" y ½"), por otro lado el material RAP se encuentra en una mejor disposición dentro de los límites establecidos, sin embargo este último carece de finos por lo que se encuentra fuera de parámetros establecidos (niveles inferiores a la malla No. 200). Por lo cual, es necesario realizar una combinación de materiales con un de los agregados vírgenes definidos en el proyecto), de la cual se aprecia que la curva del Material RAP muestra una menor cantidad de finos comparado con la curva RAP + BASE Recuperada.

Por otro lado las curvas granulométricas del agregado virgen muestran un comportamiento similar entre sí, sin embargo se procede a verificar en el siguiente apartado, cuál de los dos materiales vírgenes, mezclado con uno de los materiales obtenidos del fresado de la vía propicia una mejor granulometría de diseño.

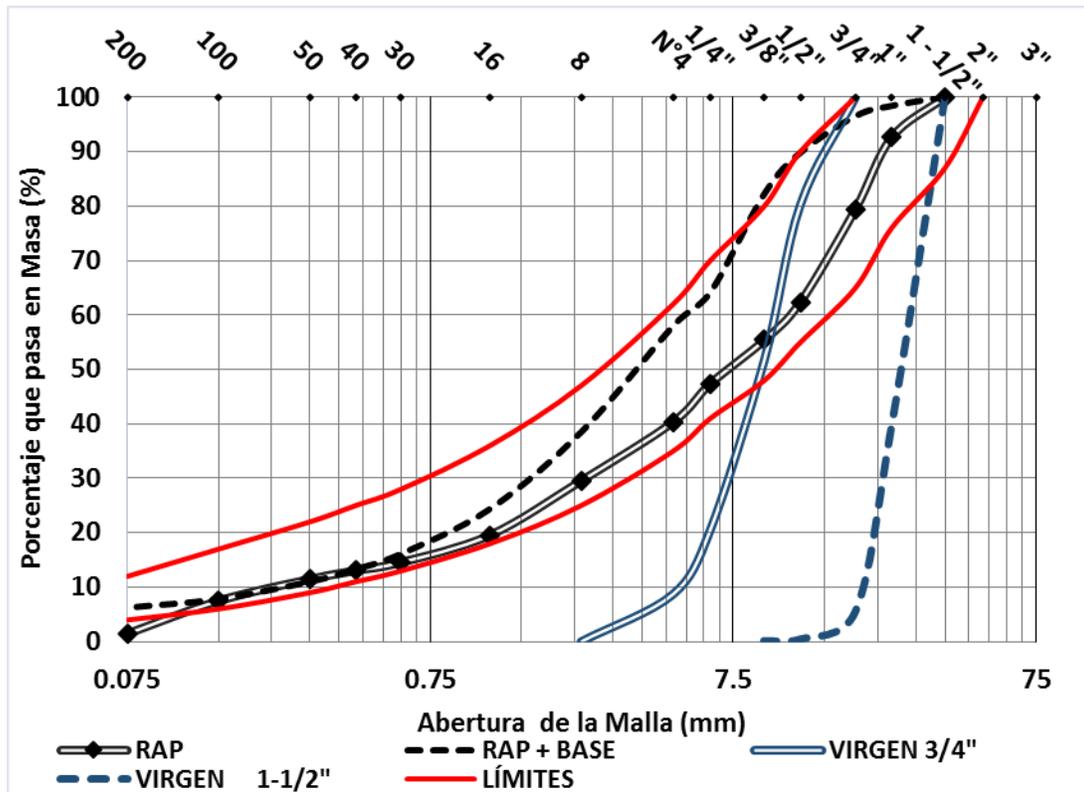


Figura 4.1 Curvas Granulométricas de los cuatro materiales analizados.

Es importante mencionar también que durante la manipulación del material RAP, se observó que dicho material es susceptible a disgregarse debido a que al agitar las partículas sobre las mallas se va degradando, por lo cual su granulometría podría variar durante su manipulación en la obra.

4.3 GRANULOMETRÍA DE DISEÑO

A partir de las granulometrías individuales se propone una combinación de materiales, los cuales cumplan con lo establecido en la Tabla 3.3 y Figura 3.10. Para esta determinación se realizaron diferentes combinaciones teóricas de los porcentajes a mezclar de cada tipo de material.

4.3.1 DOSIFICACIÓN DE MATERIALES

Además de lo anterior, los materiales Vírgenes no se consideran adecuados para la utilización individual es decir para una estabilización utilizando el 100% del material. Por lo anteriormente mencionado, se decide entonces mejorar las curvas granulométricas a partir de realizar mezclas de los diferentes materiales RAP y RAP + Base con los diferentes agregados vírgenes. LA Figura 6.3 presenta un esquema de la combinación de los materiales. Las combinaciones utilizadas fueron del 95% al 80% del material reciclado en variaciones del 5% (95%RAP-5%Virgen, 90%RAP-10%Virgen, ..., 80%RAP-20%Virgen).

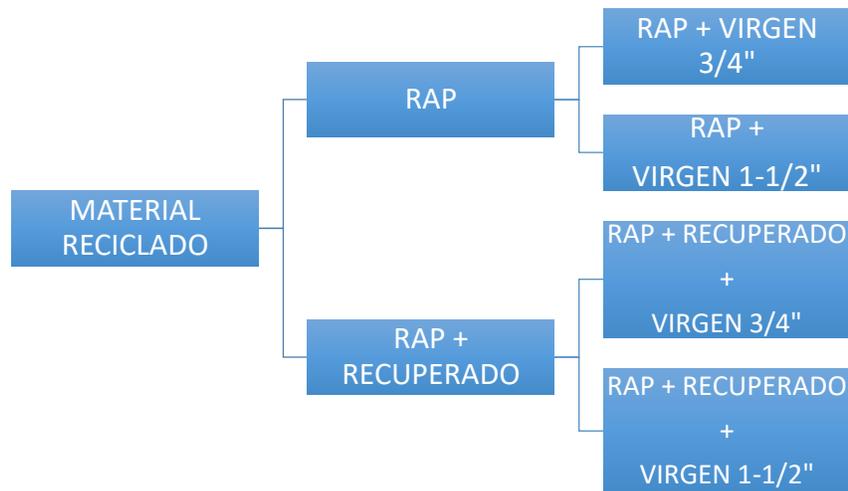


Figura 4.2 Mezclas del nuevo material dosificado

A partir del análisis de estas combinaciones teóricas se determinó la combinación que mejor cumplían con los requisitos granulométricos de la mezcla para cada tipo de RAP.

- **Mezcla I:** RAP (85%) + Material Virgen $\frac{3}{4}$ " (15%)
- **Mezcla II:** RAP + Base Recuperada (80%) + Material Virgen 1- 1/2" (20%)

En la Figura 4.3 se puede apreciar que la Mezcla I no cumple los criterios de diseño para la curva granulométrica, por lo cual ésta se descarta, y por consiguiente para fines del estudio, se llevó a cabo el proceso de diseño solamente para la Mezcla II.

Es importante mencionar que en el sentido estricto la **Mezcla II está compuesta de 40% de RAP + 40% de Base Recuperada + 20% de Material Virgen 1- 1/2"**. Por lo cual, para fines de diseño y del análisis de la influencia del contenido de RAP se considerará que esta mezcla cuenta con 40% de material reciclado.

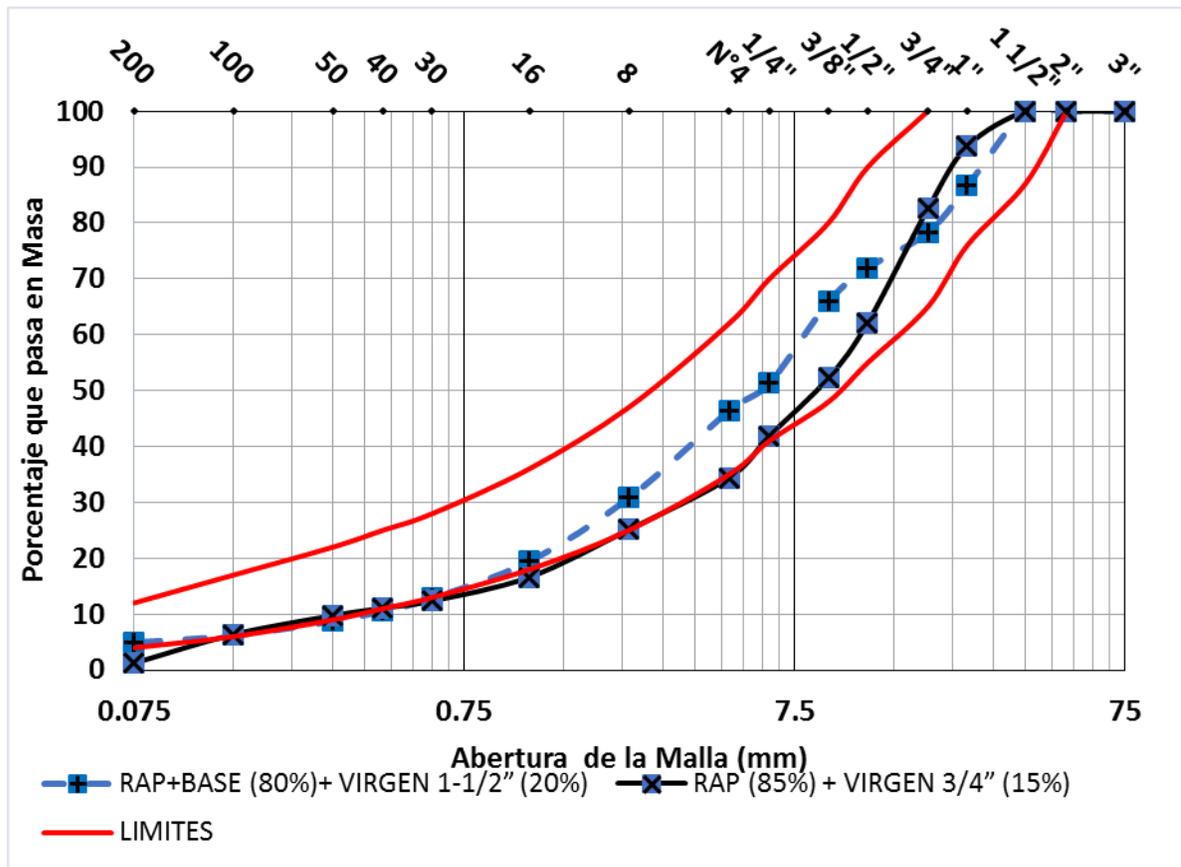


Figura 4.3 Curvas Granulométricas Finales.

4.3.2 DENSIDAD SECA MÁXIMA

Una vez definida la mezcla de materiales para el diseño se evaluó su grado de compactación de referencia mediante el ensayo de Peso Volumétrico Seco Máximo (PVSM). En este ensayo se obtuvo **una humedad óptima de 8.0%, y un PVSM de 2080 kg/m3** (Figura 4.4).

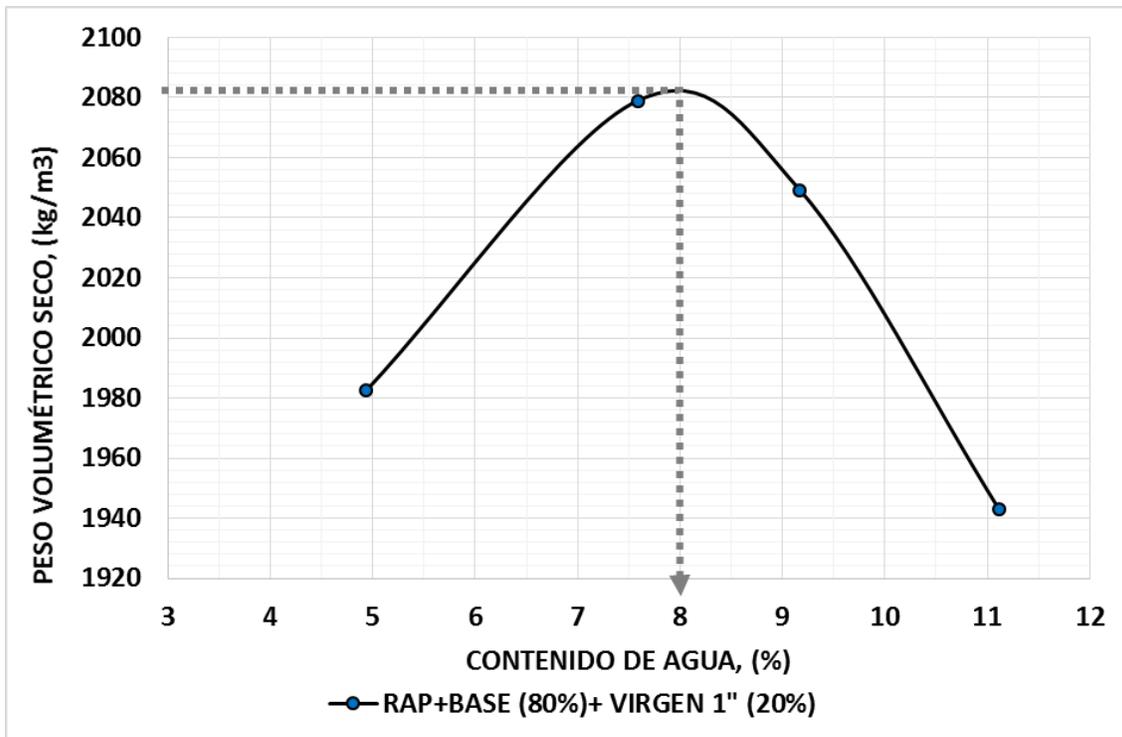


Figura 4.4 Peso Volumétrico Seco Máximo para Mezcla II.

4.3.3 PROPORCIÓN REPRESENTATIVA

El actual procedimiento de Proporción Representativa que se realiza para la Mezcla II, es decir, dependiendo de la cantidad y tipo de especímenes a realizar los cuales dependen de los diferentes Niveles de Diseño a realizar. Es decir fue calculada la cantidad de material requerido en función de su PVSM, a continuación (Tabla 4.5) se muestra la con la cantidad de material requerido para elaborar una probeta Nivel II de la mezcla II.

Tabla 4.5 Material requerido en proporción representativa para elaboración de Nivel II de la Mezcla II.

$\gamma_{d\text{MAX}}$ (kg/m ³)	2080	
W opt	8%	
Wnat	1%	
D= 6" x H=95mm ; V=	0.00167879	m ³
Masa Seca 6"	3491.9	gr

De la tabla anteriormente mostrada, es posible apreciar que para la elaboración de una probeta Nivel II se requiere 3,491.9 gr de material de la Mezcla II. Por lo tanto, para elaborar seis especímenes de 6" es necesario realizar al menos 20,946 gramos de dicho material. Si a este valor se corrige con 1% de humedad natural propio del material y también se prevé un 5% de desperdicio, se requiere un total de 22.2 kg para las seis probetas.

Sin embargo para fines prácticos se considera realizar una mezcla de 23 kg; el cual consiste en mezclar el material a ponderar junto con el asfalto espumado en el equipo WLM-30. El cálculo ponderativo o proporción representativa se ejemplifica a continuación mediante la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Material requerido en proporción representativa para bacheo de 23Kg de Mezcla II.

MATERIAL A PONDERAR		23	KG.	
Porcentaje	80%	18,400.00	Gramos	
RAP+BASE				
ANALISIS DE MALLA		CANTIDAD DE MATERIAL A SER INCLUIDO		
TAMAÑO DE MALLA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA	PASA 4.75 MM	PASA 13.2 MM Y RETIENE EN 4.75MM	PASA 19MM Y RETIENE EN 13.2
19	97	10670.44	5857.78	1871.78
12.7	90			
4.75	58			
Porcentaje	20%	4,600.00	Gramos	
VIRGEN 1-1/2"				
ANALISIS DE MALLA		CANTIDAD DE MATERIAL A SER INCLUIDO		
TAMAÑO DE MALLA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA	PASA 4.75 MM	PASA 13.2 MM Y RETIENE EN 4.75MM	PASA 19MM Y RETIENE EN 13.2
19	6	0.00	24.21	4575.79
12.7	1			
4.75	0			

De esta manera es calculada la cantidad de material necesario para cada uno de los diferentes Niveles de Diseño a realizar y por ende la cantidad de bacheos necesarios para satisfacer cada uno de los niveles analizados a lo largo de la investigación.

4.4 PROPIEDADES ESPUMANTES DEL ASFALTO

Para encontrar entonces los valores de Re y $\tau_{1/2}$, se procede a realizar diferentes barridos de temperaturas a 160° C, 170°C y 180°C (véase las figuras Figura 4.5, Figura 4.6 y Figura 4.7 respectivamente). Añadiéndose diferentes contenidos de agua (2%, 3% y 4%) a cada una de ellas.

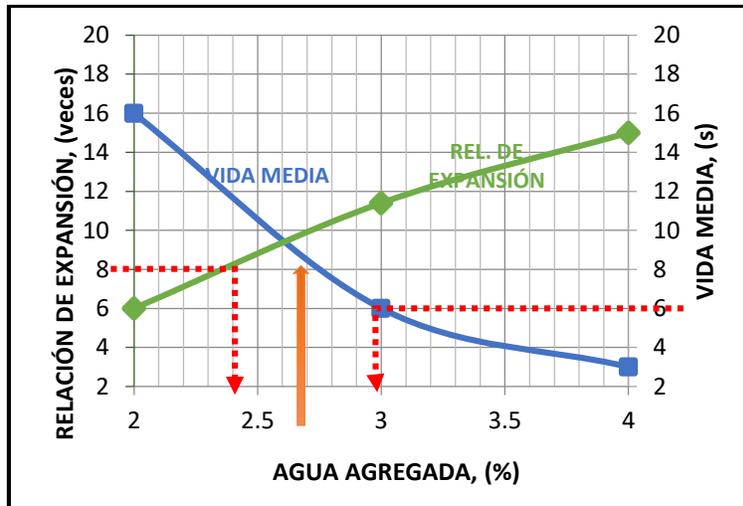


Figura 4.5 Propiedades Espumantes a 160°. Elaboración Propia.

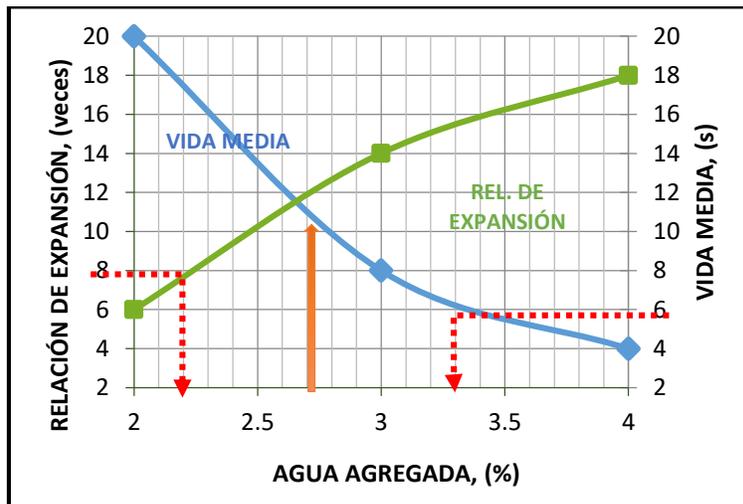


Figura 4.6 Propiedades Espumantes a 170°C. Elaboración Propia.

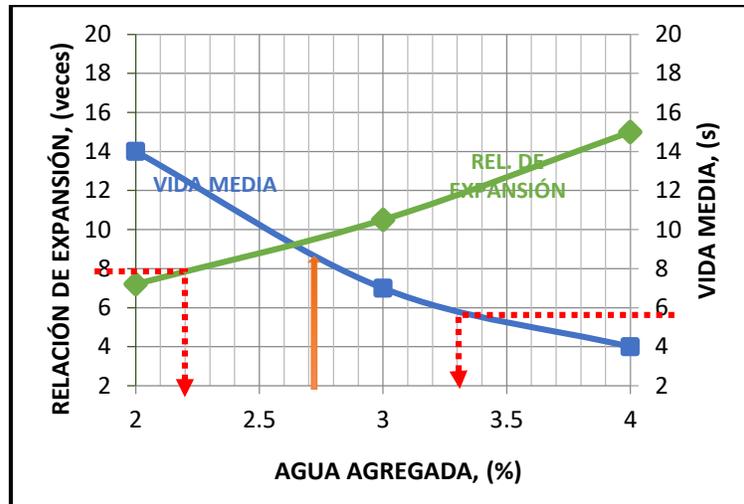


Figura 4.7 Propiedades Espumantes a 180°C. Elaboración Propia.

La determinación del contenido óptimo de agua se realiza al proyectar una línea (color rojo) partiendo de los valores límites mínimos mostrados anteriormente en la Tabla 3.5, en este caso un valor de 8 para la Re y un valor de 6 para $\tau_{1/2}$, se prolonga dicha línea hasta intersectar las curvas y posteriormente se prolonga hacia el eje de las abscisas, una vez proyectadas ambas líneas, se realiza el promedio de ambos contenidos de agua para obtener el contenido óptimo de agua (Línea Naranja). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Propiedades espumantes del asfalto a diferentes temperaturas. Fuente: Elaboración Propia.

	CANTIDA DE AGUA (%)	VIDA MEDIA (SEG)	RELACIÓN DE EXP. (VECES)
160 ° c	2.7	8.5	9.8
170 ° C	2.7	10.5	12.2
180 ° C	2.75	8.5	9.5

A partir de la tabla anteriormente mostrada, se puede observar que para las tres temperaturas evaluadas el contenido de agua que mejor resultados presenta es del orden de 2.7%. De igual forma se observa que la temperatura de 170°C es la que presenta los

mayores valores de vida media y de relación de expansión. Por lo cual, para fines de diseño se considera que la condición óptima de espumado del asfalto se presenta para **un contenido de agua de 2.7% a 170°C de temperatura.**

Es necesario mencionar que los valores obtenidos de la espuma se realizaron a una temperatura ambiente de 25°C, con lo cual es importante considerar como una variable más en la determinación, la cual dependerá de la región en donde se realice la obra.

El asfalto utilizado (AC-20) es el asfalto que se produce en la mayoría de las refinerías en México, y por lo cual será el más común para su utilización en la fabricación de asfalto espumado. De la evaluación realizada se concluye que este es un asfalto apto para su utilización en esta metodología.

4.5 DISEÑO NIVEL I

Después de realizar la caracterización de los materiales, y haber definido la granulometría y condiciones de espumado del asfalto se procede a la evaluación del Nivel I de la metodología, la cual tiene como objetivo definir si la mezcla de materiales requiere la incorporación de un filler activo.

Primeramente se realizó la evaluación de la mezcla sin inclusión de filler activo. En esta evaluación se observó que la mezcla obtuvo un valor de TSR en seco de 219 kPa, la cual es inferior al valor mínimo requerido (225kPa, Tabla 3.9), adicionalmente no obtuvo resistencia en condición saturada, por lo cual se considera que esta mezcla no cumple con los requisitos mínimos de calidad y por lo cual se requiere agregar un filler activo. Por lo cual las siguientes dos evaluaciones se realizaron con 1% de Cal y 1% de Cemento Portland.

En la evaluación en seco de las dos mezclas con filler activo se puede observar que ambas cumplen con el requisito mínimo establecido en la metodología. Sin embargo, en condición saturada la mezcla con cemento portland pierde considerablemente su resistencia obteniendo un valor de 13 kPa dando como resultado un TSR de 5%, por lo cual se considera inadecuado para la mezcla de materiales propuesta. La mezcla de materiales con cal también tuvo una reducción de su resistencia en condición saturada pero menos significativa (166kPa), lo cual le da como resultados un valor de TSR de 68%. Por lo cual se considera que este filler activo es el más adecuado para la mezcla de materiales propuesta.

Los resultados obtenidos en el Diseño Nivel I se muestran a presentan en la Tabla 4.8. y Figura 4.8.

Tabla 4.8 Comparativa de valores TSR para selección de Filler Activo.

FILLER	SIN FILLER						CEMENTO						CAL											
CONT. ASF. ESP.	2.4																							
DIÁM. ESP.	100 mm						100 mm						100 mm											
MUESTRA	10	11	12	13	14	15	10	11	12	13	14	15	10	11	12	13	14	15						
MASA ESP. (g)	1035.0	1040.9	1032.6	1036.7	1034.0	1033.6	1055.0	1049.0	1045.4	1039.5	1046.3	1048.1	1068.3	1083.5	1065.4	1088.1	1085.4	1059.7						
ALTURA (mm)	62.67	62.90	62.61	62.52	62.48	62.68	63.75	63.94	63.90	64.21	64.14	64.02	63.75	63.94	63.90	64.21	64.14	64.02						
DIÁMETRO (mm)	99.84	99.81	99.77	99.75	99.75	100.05	100.20	100.27	100.22	100.10	100.03	100.20	99.54	99.44	99.64	99.72	99.84	99.66						
DA (kg/m ³)	2109.5	2115.0	2109.6	2121.9	2117.7	2097.5	2098.7	2077.6	2073.9	2057.1	2075.8	2076.2	2153.4	2181.9	2138.2	2169.8	2161.5	2122.0						
PROM (kg/m ³)	2112						2077						2154											
CONT. AGUA (%)	0.6	0.7	0.6	3.4	3.4	3.4	0.5	0.7	0.6	3.5	3.5	3.5	0.7	0.6	0.7	4.1	4.1	3.5						
LECTURA CARGA	86	91	72	0	0	0	91	104	88	3	9	5	91	104	88	65	68	60						
CARGA (kN)	2.2	2.4	1.9	0.0	0.0	0.0	2.4	2.7	2.3	0.1	0.2	0.1	2.4	2.7	2.3	1.7	1.8	1.5						
TEMP. (°C)	23.0	23.3	23.2	23.0	23.3	23.0	26.9	26.9	26.9	23.0	23.3	23.0	26.9	26.9	26.9	23.0	23.3	23.0						
CONDICIÓN	SECO			SATURADO			SECO			SATURADO			SECO			SATURADO								
ITS (kPa)	227	239	190	0	0	0	235	268	227	5.95	21.5	11.2	237	270	228	167	175	155						
PROM (kPa)	219			0			243			13			245			166								
TSR (%)	0			0			3			8			5			71			65			68		
TSR PROM (%)	0						5						68											
OBSERVACIONES PARA SELECCIÓN DE FILLER						SE REQUIERE EL USO DE CAL COMO FILLER ACTIVO																		

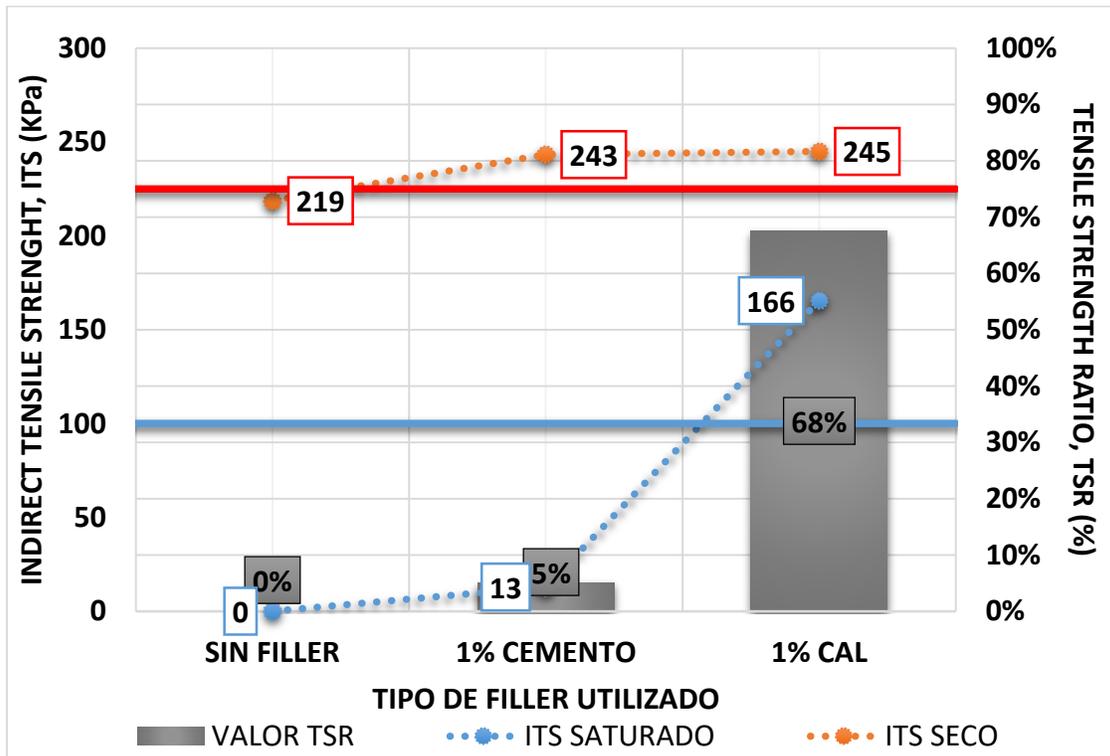


Figura 4.8 Valor TSR para selección de Filler de la Mezcla II.

Para el presente Nivel I es posible concluir que a pesar de que todos los valores de ITS_{SECO} son de magnitudes similares, las propiedades en condición saturada son diferentes. Por lo cual, se puede concluir que el indicador clave en el diseño Nivel I es la resistencia de la mezcla condición saturada, lo cual se debe tomar en cuenta tanto en el diseño como en el control de calidad de la base estabilizada con asfalto espumado.

4.6 DISEÑO NIVEL II

Una vez definido el filler activo a utilizar en la mezcla de materiales se procede a determinar el contenido de asfalto espumado óptimo. Tal como se mencionó en la sección de metodología, la cantidad de 2.4% de asfalto espumado se ajusta en incrementos de 0.1% es decir; Se analizan los comportamientos mecánicos de la mezcla con valores de 2.2%, 2.3%, 2.4% y 2.5% de asfalto espumado respectivamente, esto mediante el ensayo de los especímenes de Diseño Nivel II.

A continuación, en la Tabla 4.9 se presentan los valores obtenidos de la Mezcla I, en la cual es posible apreciar los valores $ITS_{EQUILIBRIO}$ e $ITS_{EQUI-SAT}$, asimismo es posible apreciar los valores de TSR obtenidos. Siendo el valor de 2.4% de AE óptimo para el diseño debido a su poca variación en comparación a 2.5%. Los resultados obtenidos se presentan gráficamente en la Figura 4.9.

Tabla 4.9 Optimización de Asfalto espumado con 1% de Cal

CONT. ASF. ESP.	2.2						2.3						2.4						2.5					
	150 mm						150 mm						150 mm						150 mm					
MUESTRA	7	8	9	28	29	30	16	17	18	31	32	33	25	26	27	31	32	33	43	44	48	45	46	47
MASA ESP. (g)	3722.0	3715.6	3692.8	3607.8	3626.4	3612.7	3708.1	3710.6	3712.1	3608.6	3606.5	3608.7	3680.7	3715.1	3696.3	3594.0	3606.4	3589.0	3572.3	3584.8	3587.6	3587.1	3595.0	3577.2
ALTURA (mm)	95.89	95.77	95.89	95.73	95.16	95.60	96.30	96.22	95.76	95.31	95.14	94.91	95.30	96.11	96.84	95.65	95.52	95.74	94.76	94.72	94.45	94.58	94.57	94.57
DIÁMETRO (mm)	150.11	150.24	150.21	150.20	150.42	150.29	150.1	150.3	150.2	150.2	150.3	150.3	150.1	150.4	150.3	150.3	150.4	150.3	150.10	149.96	149.93	150.10	149.92	150.11
DA (kg/m ³)	2193.3	2188.5	2173.2	2127.0	2144.5	2130.2	2176.1	2173.6	2187.8	2135.7	2136.8	2142.8	2181.5	2174.9	2151.3	2117.8	2124.3	2112.9	2130.3	2142.9	2151.4	2143.5	2153.5	2137.6
PROM (kg/m ³)	2159						2159						2144						2143					
CONT. AGUA (%)	1.0%	0.5%	1.0%	5.8%	5.6%	5.1%	1.0%	0.9%	1.0%	5.0%	5.0%	5.7%	0.8%	1.1%	1.0%	5.1%	5.0%	4.7%	1.1%	1.0%	0.8%	4.5%	4.7%	4.6%
TEMP. (°C)	23.4	23.3	23.2	23.0	23.3	23.0	23.2	23.5	23.3	24.5	24.5	24.5	23.2	23.5	23.3	24.5	24.5	24.5	23.4	23.3	23.2	24.5	24.5	24.7
LECTURA CARGA	194	199	193	117	115	134	207	195	208	172.6	150.2	157.7	196	197	201	219	198	189	254	254	242	225	186	232
CONDICIÓN	EQUILIBRIO			EQUI-SAT																				
ITS (kPa)	223.1	228.9	221.8	134.5	132.8	154.2	237	223.2	239.4	199.5	173.8	182.9	226.7	225.5	228.6	207.5	187.7	178.9	243.3	243.6	233	215.9	178.7	222.7
PROM (kPa)	225			141			237			185			227			191			240			206		
TSR (%)	60		58		70		84		78		76		92		83		78		89		73		96	
TSR (%)	63						79						85						86					

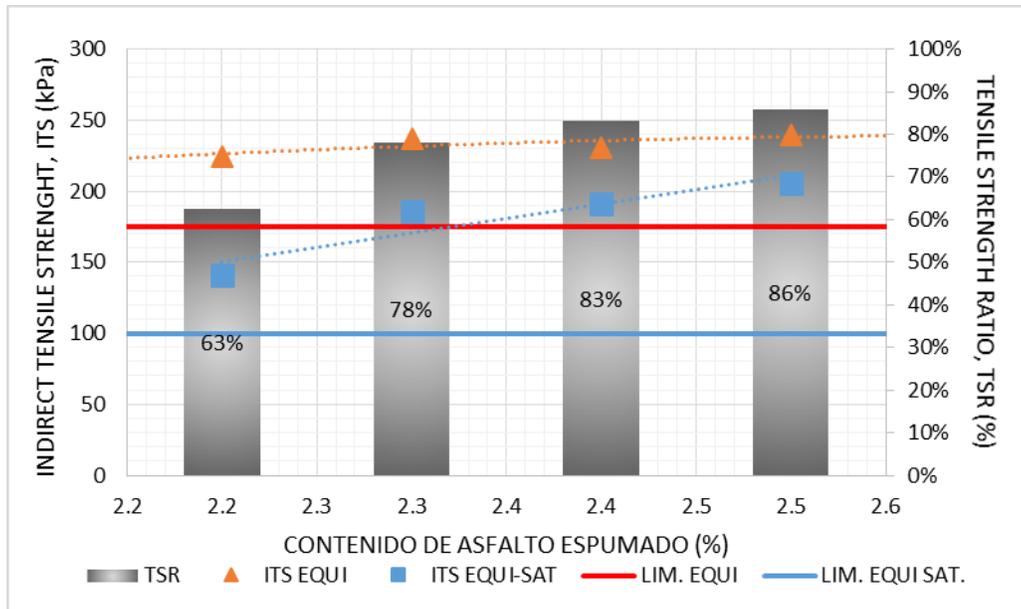


Figura 4.9 Contenido óptimo de Asfalto con 1% de Cal.

De la figura anterior, es posible apreciar que el valor de $ITS_{EQUI-SATURADO}$ da la pauta al valor de TSR de la mezcla de materiales. Esta evaluación confirma lo observado en el Nivel I en donde la evaluación en condición saturada define la selección de la mezcla más adecuada.

Por lo anterior es posible concluir que la mezcla de materiales con 1% de Cal y 2.4% de asfalto espumado, cumple las especificaciones establecidas en la metodología.

- $ITS_{EQUI} = 227 \text{ KPa}$
- $ITS_{EQUI-SAT} = 197 \text{ KPa}$
- $TSR = 83\%$

Esta última evaluación define lo que se denomina la fórmula de trabajo, la cual es la siguiente:

- ✓ Mezcla II [RAP + BASE (80%) con 20% de material Virgen 1- 1/2"] con una humedad óptima de 8.0%, y un PVSM de 2080 kg/m³
- ✓ Asfalto Espumado producido a 170°C de temperatura y con 2.7% de agua.
- ✓ Uso de 1% de Cal como filler activo con el propósito de disminuir la susceptibilidad de a la humedad.
- ✓ Implementación de 2.4% de Asfalto Espumado a la mezcla.

Para el presente Nivel II, es posible concluir que a pesar de los valores de ITS_{EQUI} con 2.4% y 2.5% de asfalto espumado son similares, por cuestiones de economía se utiliza el contenido de 2.4% de asfalto espumado. Adicionalmente es posible apreciar que el valor de TSR es superior al 80% lo cual representa un buen desempeño aun con la presencia de humedad.

4.7 DISEÑO NIVEL III

Esta tercera evaluación tiene como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla de trabajo definida en las evaluaciones anteriores.

Para esta evaluación se fabricaron 8 especímenes de ensayo para evaluarlos en el ensayo de triaxial. Se utilizaron cuatro condiciones de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100kPa y 200kPa,) realizando una réplica en cada condición. La determinación de los valores de cohesión (C) y del ángulo de fricción (φ) se realizó mediante el Círculo de Mohr-Coulomb. La Figura 4.10 presenta la envolvente de falla de la mezcla de materiales

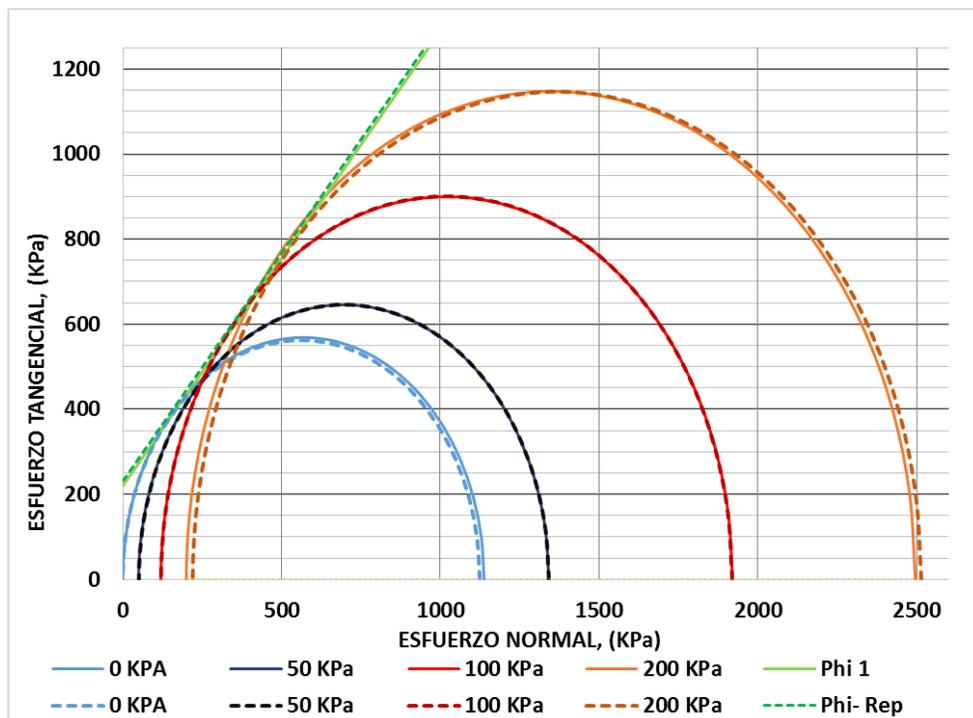


Figura 4.10 Cohesión y Fricción para 2.4% de Asfalto espumado y 1% de Cal.

Al trazar la envolvente de falla tanto de las primeras cuatro probetas como de las réplicas, es posible apreciar la tendencia de la envolvente de falla, por ende se obtiene un valor de cohesión y fricción similar para la primera prueba y su consecuente réplica. A continuación se muestra la

Tabla 4.10, en la que es posible corroborar dichos valores.

Tabla 4.10 Valores de Cohesión y Fricción para la Mezcla II

PRUEBA	COHESIÓN, C (kPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ϕ
2.4 % A.E.	251.1	44°
2.4 % A.E. - RÉPLICA	244.7	46°
PROMEDIO	247.9	45°

Al analizar tabla anterior, se observa que el valor de cohesión se encuentra en el orden de los 250 KPa, el cual, es un valor ligeramente inferior al mínimo requerido por la literatura (250 KPa). Por otra parte, el valor del ángulo de fricción interna, supera los 40° requeridos por la especificación. Por consiguiente, es posible concluir que la mezcla de materiales cumple con las propiedades mecánicas requeridas en la metodología.

Si se requiriese aumentar el parámetro de cohesión para obtener un material que cumpla con el parámetro de cohesión, será necesario hacer énfasis en la curva granulométrica, aumentando el porcentaje de finos que pasa la malla 200, ya que ésta última, se encuentra solo por encima del límite inferior, lo que se traduce en baja cohesión del material.

Como conclusión particular para el presente diseño, es sumamente importante vigilar el parámetro de cohesión del material y su posible variabilidad, debido principalmente a la dispersión granulométrica que se llegase a suscitar en campo.

Además que, al utilizar filler activo, es también importante mencionar que una vez elaborada la mezcla, se proceda a elaborar la compactación del espécimen lo antes posible. Ya que la cohesión se encontrará en función de la densificación de la mezcla y por ende de la cantidad de humedad al momento de realizar el proceso de compactación.

5. INDICADOR PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS, MÓDULO DE RESILIENCIA

Una de las dudas fundamentales que se tienen al utilizar esta metodología es la capacidad estructural que pueden obtener las mezclas con asfalto espumado. Por lo cual, fue necesario realizar una evaluación del MR de la mezcla de materiales.

Las condiciones del ensayo fueron similares al DISEÑO NIVEL III, es decir la metodología de compactación fue acorde a lo señalado en la sección 3.4.3.1. Los resultados obtenidos de la prueba ejecutada para el 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal de la Mezcla II, se presenta en la Figura 5.2. De la cual es posible apreciar que para un confinamiento de 103.5 KPa (usualmente el valor del esfuerzo radial para un eje dual a una profundidad de 20cm) se obtiene un Módulo de Resiliencia el cual oscila entre 850-1150 MPa, y aumentando el confinamiento se alcanza un Módulo desde 933 hasta 1161 MPa.

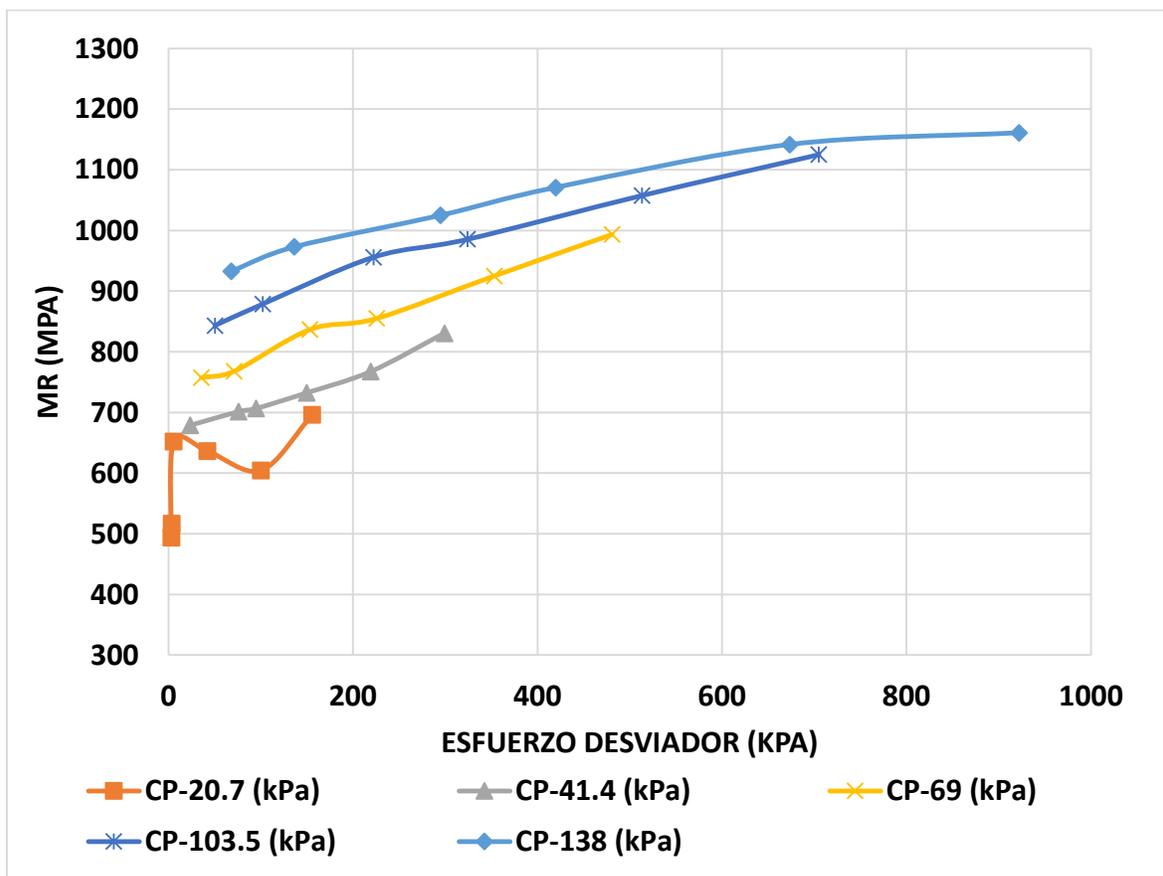


Figura 5.1 Ensayo MR para Mezcla II con 2.4% de Asfalto Espumado y 1% de Cal.

Es importante hacer énfasis, a lo que se menciona anteriormente debido a que el M_R no es un valor único; sino que éste depende del confinamiento y la carga axial aplicada al espécimen. Es decir, dependiendo del valor de confinamiento así como la carga axial aplicada sobre el material, será la capacidad que tiene el mismo de recuperar su deformación plástica. Razón por la cual se opta por graficar el valor de M_R medido vs. Esfuerzo volumétrico (Θ), donde:

$$\theta = \text{Esfuerzo volumétrico } (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \text{Ecuación 14}$$

De esta manera es posible analizar el valor del M_R en función de Θ , y predecir así el comportamiento del material mediante cargas cíclicas, lo que por ende conlleva a realizar un análisis más confiable para un diseño de pavimentos. A continuación (Figura 5.2) se grafican los valores obtenidos de M_R para cada uno de los esfuerzos volumétricos calculados. Los valores pueden ser analizados con una línea de tendencia del comportamiento del M_R , ($M_R = 174.39 \theta^{0.266}$, $R^2 = 0.9436$).

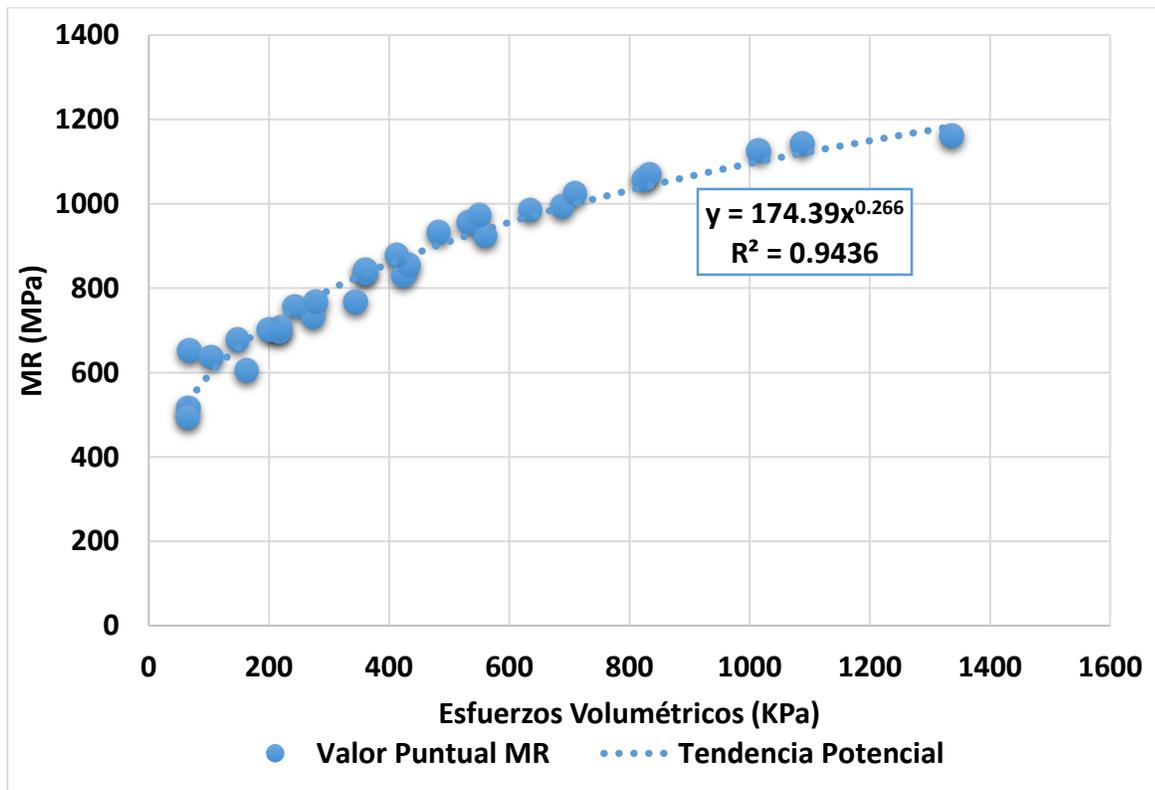


Figura 5.2 Módulo de Resiliencia para una base estabilizada con 2.4% de A.E. y 1% de Cal

Por lo que si se pretende conocer el valor de M_R en una estructura de pavimento, donde la capa de rodadura es una mezcla asfáltica con un valor de Módulo Elástico determinado, es posible conocer el valor de M_R de la base estabilizada al analizar la profundidad a la que se analizará el esfuerzo aplicado a la misma debido al tipo de tránsito esperado para dicha estructura vial.

Razón por la cual, es sumamente necesario conocer el presente parámetro mediante una prueba de M_R , y que no sea como regularmente se utiliza al diseñar un pavimento mediante una estimación o correlación con otro parámetros, debido a que éstos últimos no predicen el comportamiento de un material estabilizado con asfalto espumado. Sin embargo para fines de referencia se analiza el resultado obtenido de la Mezcla II estabilizada con 2.4% de AE y 1% de Cal en comparativa con una base hidráulica tradicional, véase Figura 5.3. Siendo que la base estabilizada con AE, obtiene un mayor M_R en comparación de una base hidráulica convencional.

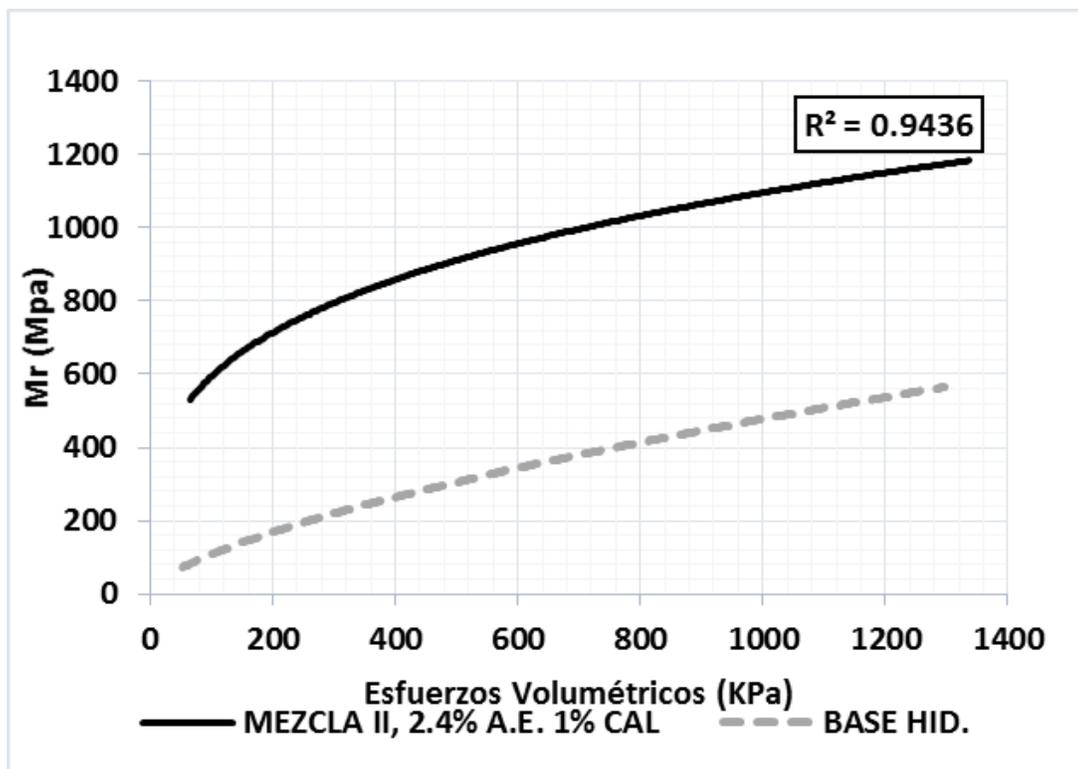


Figura 5.3 Comparativa de M_R de la Mezcla II estabilizada con 2.4% AE y 1% Cal vs una Base hidráulica tradicional.

Como conclusión particular para el presente diseño, es posible afirmar que el asfalto espumado tiene un mejor desempeño en comparación a una base hidráulica tradicional, lo que se traduce en un valor de MR mayor.

Siendo este último valor, un excelente candidato de material base para el uso en el diseño de pavimentos en México tal es el caso del DISPAV, o cualquier otra metodología que requiera de un valor de MR.

6. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO EN EL DESEMPEÑO DE LA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO

Este capítulo tiene como objetivo evaluar la influencia de 3 parámetros de diseño en el comportamiento mecánico de una base estabilizada con asfalto espumado.

Los parámetros analizados son, el tipo de filler activo (cal y cemento) y el porcentaje de asfalto espumado. Dichas variables fueron analizadas a partir de la mezcla de materiales utilizada en el capítulo anterior. Los ensayos utilizados para la evaluación de dichos parámetros fueron 3. Primeramente la evaluación de la susceptibilidad a la humedad mediante el ensayo de TSR (Nivel II), la segunda evaluación se realizó con el ensayo triaxial (Nivel III), finalmente se realizaron determinaciones del M_R para algunas de las condiciones de ensayo.

6.1 INFLUENCIA DEL FILLER ACTIVO

Para la evaluación de la influencia del contenido de asfalto espumado en cada condición de filler (con 1% de cal, 1% de cemento Portland y Sin Filler), la evaluación realizada fue la resistencia a la tensión indirecta tanto en condición de equilibrio como en condición saturada. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.9 (1% cal), Tabla 6.1 (1% cemento), Tabla 6.2 (Sin Filler).

Tabla 6.1 Optimización de Asfalto espumado con 1% de Cemento

CONT. ASF. ESP.	2.3						2.4						2.5					
DIÁM. ESP.	150 mm						150 mm						150 mm					
MUESTRA	7	8	9	1	2	3	16	17	18	4	5	6	25	26	27	7	8	9
MASA ESP. (g)	3570.4	3578.1	3592.4	3631.0	3632.5	3627.9	3580.8	3576.3	3602.2	3614.4	3620.9	3635.5	3627.5	3624.0	3622.2	3621.0	3607.1	3615.4
ALTURA (mm)	94.57	94.47	94.37	96.07	96.04	95.7	94.25	94.35	94.39	95.87	95.72	95.50	95.24	95.64	96.00	95.70	95.41	95.28
DIÁMETRO (mm)	150.17	150.07	150.30	150.30	150.28	150.29	149.87	150.00	150.28	150.72	150.39	150.64	149.96	150.26	150.11	150.24	150.22	150.22
DA (kg/m ³)	2131.6	2141.3	2145.6	2130.3	2132.4	2136.9	2153.7	2145.0	2151.5	2113.1	2129.5	2135.9	2156.5	2136.8	2132.0	2134.3	2133.1	2141.0
PROM (kg/m ³)	2136						2138						2139					
CONT. AGUA (%)	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	5.1	5.1	5.1	4.7	4.7	4.7	5.1	5.1	5.1	4.7	4.7	4.7
LECTURA CARGA	133	143	121	84	81	91	157	150	139	94	93	81	148	167	146	79	83	86
CARGA (kN)	3.5	3.7	3.1	2.2	2.1	2.4	4.1	3.9	3.6	2.4	2.4	2.1	3.8	4.3	3.8	2.0	2.2	2.2
TEMP. (°C)	23.4	23.3	23.2	23.0	23.3	23.0	23.2	23.5	23.3	24.5	24.5	24.5	23.2	23.5	23.3	24.5	24.5	24.5
CONDICIÓN	EQUILIBRIO			EQUI-SAT			EQUILIBRIO			EQUI-SAT			EQUILIBRIO			EQUI-SAT		
ITS (kPa)	154.9	166.8	141	95.96	92.55	104.4	183.9	175.3	162.1	107.4	106.6	92.85	171.4	192.3	167.6	90.59	95.52	99.13
PROM (kPa)	154			98			174			102			177			95		
TSR (%)	62						59						53					

Tabla 6.2 Optimización de Asfalto espumado Sin Filler Activo.

CONT. ASF. ESP.	2.3						2.4						2.5					
DIÁM. ESP.	150 mm						150 mm						150 mm					
MUESTRA	1	2	3	1	2	3	10	11	12	4	5	6	25	26	27	7	8	9
MASA ESP. (g)	3570.4	3578.1	3592.4	3575.0	3569.1	3572.3	3580.8	3576.3	3602.2	3596.4	3561.6	3587.6	3588.0	3582.3	3584.7	3583.3	3563.8	3573.6
ALTURA (mm)	94.57	94.47	94.37	94.43	94.73	94.44	94.25	94.35	94.39	94.63	94.26	94.19	94.48	94.31	94.51	94.67	94.7	94.53
DIÁMETRO (mm)	150.17	150.07	150.30	150.20	150.42	150.29	149.87	150.00	150.28	150.24	150.29	150.31	150.38	150.57	150.26	150.30	150.43	150.30
DA (kg/m³)	2131.6	2141.3	2145.6	2136.7	2120.2	2132.3	2153.7	2145.0	2151.5	2143.8	2129.9	2146.5	2138.2	2133.2	2138.9	2133.4	2117.4	2130.7
PROM (kg/m³)	2135						2145						2132					
CONT. AGUA (%)	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
LECTURA CARGA	50	48	34	0	0	0	40	59	64	0	0	0	46	63	50	0	0	0
CARGA (kN)	1.3	1.2	0.9	0.0	0.0	0.0	1.0	1.5	1.7	0.0	0.0	0.0	1.2	1.6	1.3	0.0	0.0	0.0
TEMP. (°C)	23.4	23.3	23.2	23.0	23.3	23.0	23.2	23.5	23.3	24.5	24.5	24.5	23.2	23.5	23.3	24.5	24.5	24.5
CONDICIÓN	EQUILIBRIO			EQUI-SAT			EQUILIBRIO			EQUI-SAT			EQUILIBRIO			EQUI-SAT		
ITS (kPa)	57.8	55.5	39.1	0.0	0.0	0.0	46.3	68.5	74.2	0.0	0.0	0.0	53.1	73.0	57.8	0.0	0.0	0.0
PROM (kPa)	51			0			63			0			61			0		
TSR (%)	0						0						0					

En la tabla anterior se muestra el valor $ITS_{EQUILIBRIO}$ en incremento, por otro lado los valores $ITS_{EQUI-SAT}$ se comportan de una manera lineal, es decir mantienen un buen comportamiento a la presencia de humedad, tal se puede apreciar en la Figura 6.1.

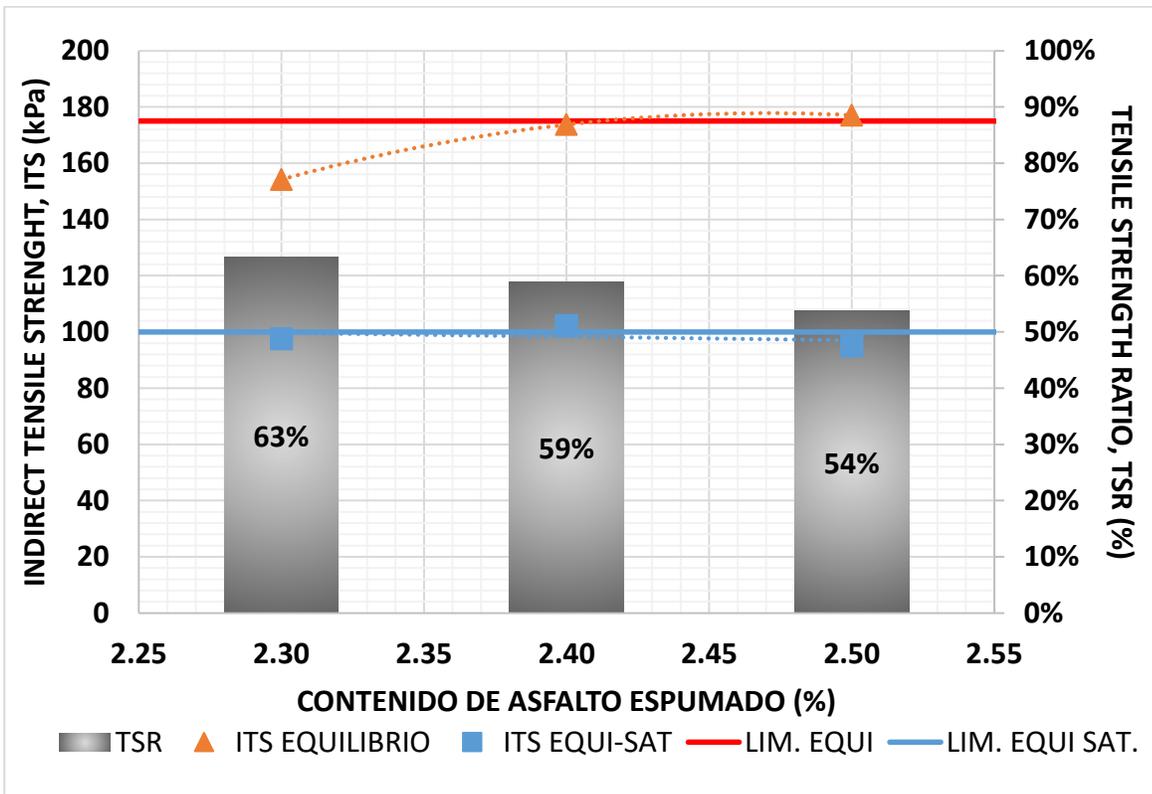


Figura 6.1 Contenido Óptimo de Asfalto con 1% de Cemento.

De la figura anterior, es posible apreciar que el valor mínimo requerido en $ITS_{EQUI-SATURADO}$ (100 KPa), sólo se cumple al adicionar el 2.4% de asfalto, sin embargo es importante señalar que al utilizar la cantidad de 2.3% de asfalto se obtiene un valor mayor de TSR.

En conjunto con la investigación de la influencia del filler activo (cal y cemento), se preparan las dosificaciones necesarias para desarrollar la investigación del comportamiento de los especímenes en la mezcla sin filler a razón de 2.3%, 2.4% y 2.5% de asfalto espumado, dichos valores obtenidos, se muestran a continuación en la Tabla 6.2.

Al analizar la Tabla 6.2, en primer lugar es posible apreciar que en los ensayos de las probetas de $ITS_{EQUILIBRIO}$ presenta valores que propician a una tendencia decreciente. Así también al visualizar los valores $ITS_{EQUI-SAT}$ se comportan de una manera fallida, debido a que, en el momento del ensayo los especímenes fallaron sin registrar resistencia a la carga alguna (0 KPa), razón por la que se anexa la Figura 6.2 para su análisis.

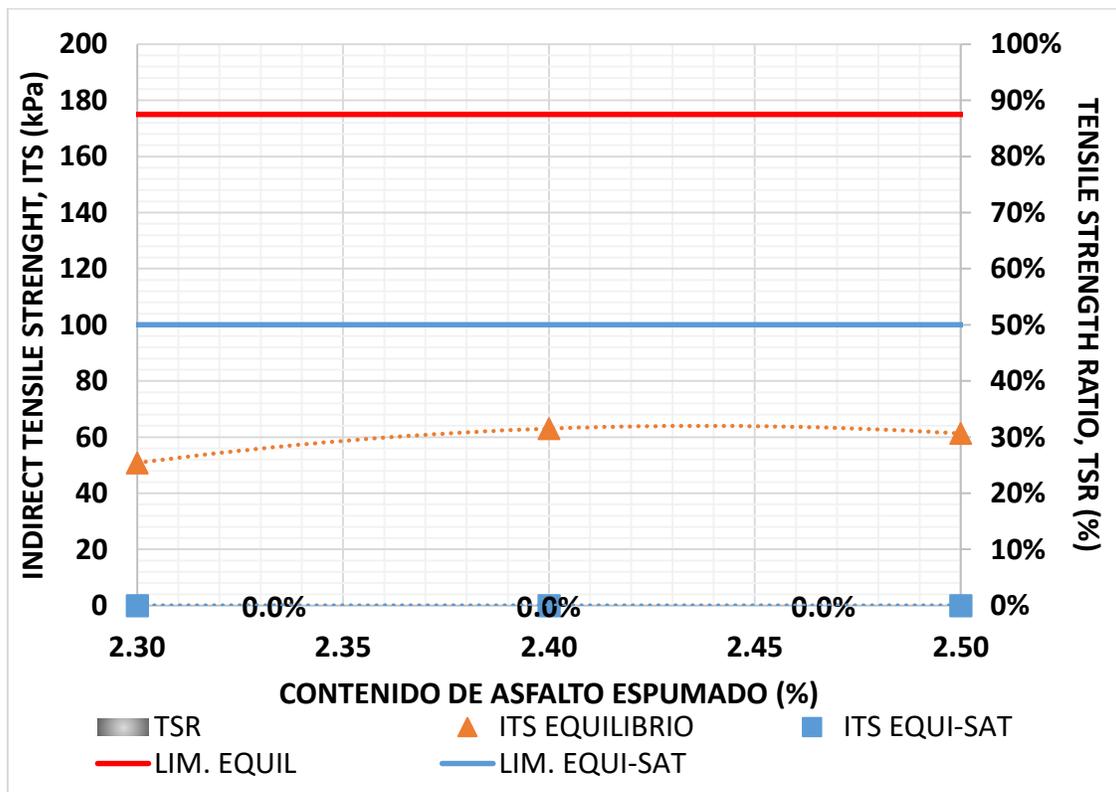


Figura 6.2 Contenido Óptimo de Asfalto Sin Filler Activo.

A partir de la Figura 6.2, es posible percatarse principalmente de dos particularidades. La primera de ellas es que, al no añadir filler activo se requiere utilizar 2.4% de asfalto espumado para obtener el mejor comportamiento de las probetas $ITS_{EQUILIBRIO}$, no obstante el valor mínimo requerido para dichas probetas (175 KPa) no se alcanza.

Por lo que es posible afirmar que todos los resultados obtenidos a lo largo del Nivel II, demuestran una capacidad mecánica diferente al variar el filler activo utilizado, por ende se realiza un gráfico (véase Figura 6.3) en el cual se pueda apreciar la influencia del contenido de asfalto con respecto a cada uno de los filler activos en específico.

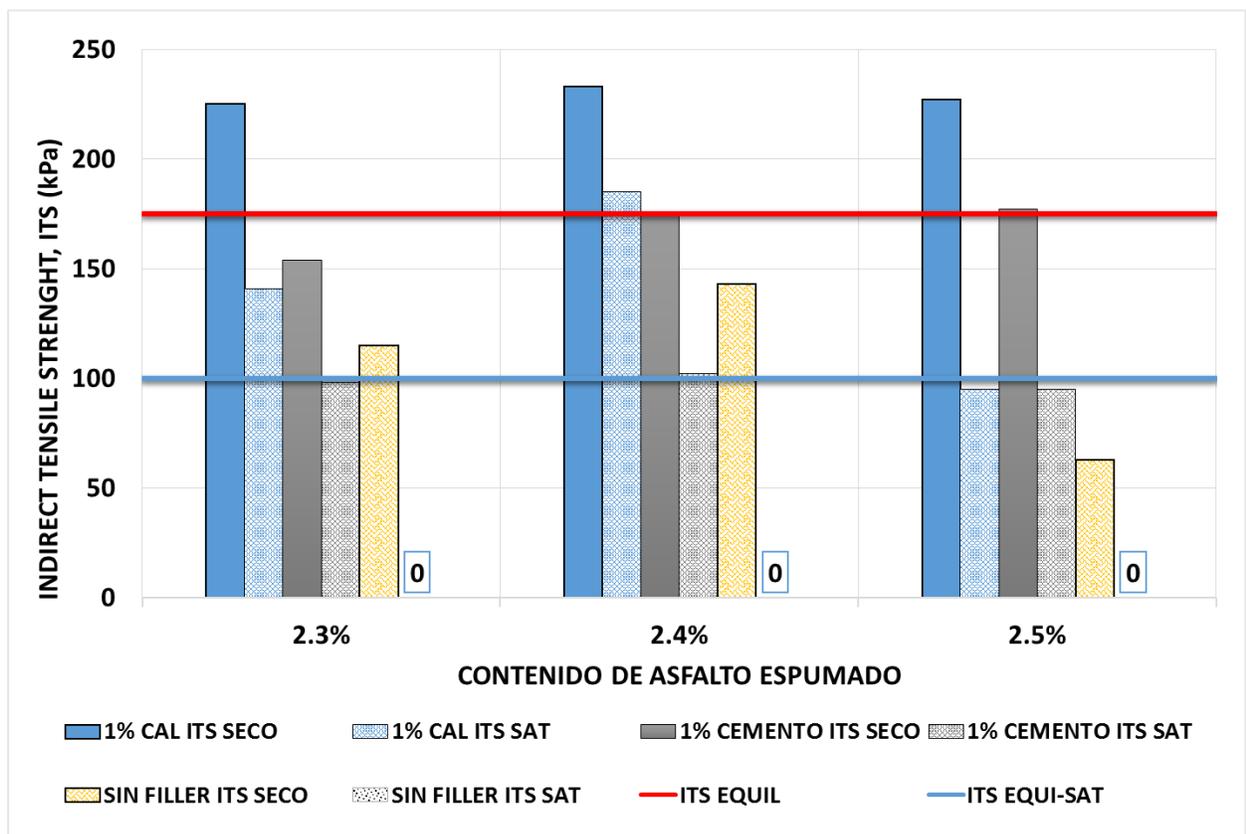


Figura 6.3 Influencia del Contenido de Asfalto Espumado en los valores ITS. Elaboración Propia.

De la figura mostrada anteriormente es posible apreciar que al aumentar el contenido asfáltico el valor ITS_{EQUIL} incrementa y posteriormente decaiga como una parábola cóncava hacia abajo. No obstante aun cuando los valores obtenidos se encuentren por encima del valor mínimo requerido, el desempeño de la mezcla sigue en función de los valores obtenidos de $ITS_{EQUI-SATURADO}$. Ya que éstos últimos, dan la pauta

del valor TSR. Lo anterior se concluye debido a que, al utilizar el material RAP envejecido aumenta la susceptibilidad a la humedad, y por ende se aprecia un decremento del valor ITS al someterse en saturación, dentro de los cuales el valor más afectado (0KPa) es cuando no se utiliza el filler activo.

A continuación se analiza el comportamiento de la influencia del filler activo a los diferentes contenidos de asfalto espumado, véase Figura 6.4.

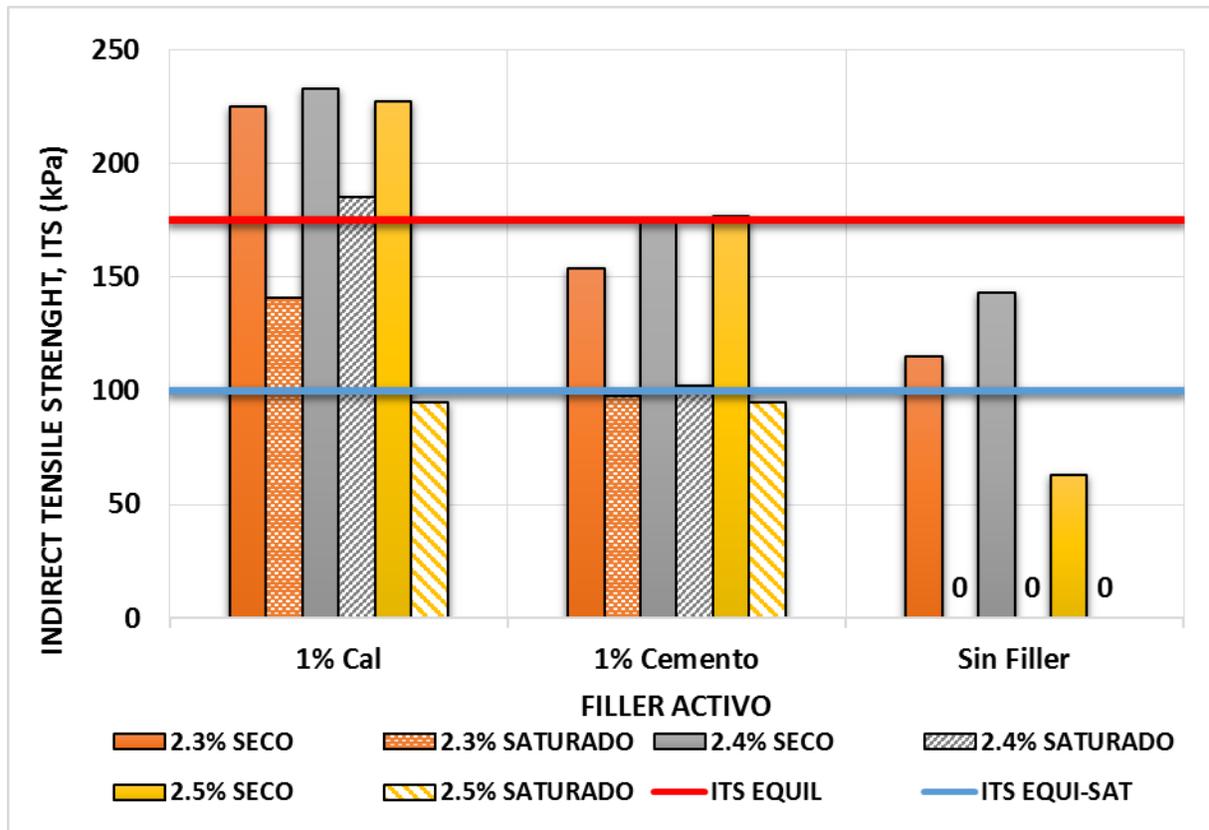


Figura 6.4 Influencia del filler activo en los valores ITS. Elaboración propia.

A partir de la anterior es posible apreciar que el único filler activo que supera los límites mínimos pre-establecidos por el manual Wirtgen es el 1% de Cal. Por otra parte al analizar el 1% cemento es posible corroborar que se encuentra justo al límite de los mismos.

6.1.1 DISCUSIÓN PARTICULAR

Por lo anterior es posible concluir que el utilizar la cal como filler activo aumenta la cohesión del material sustancialmente, sin embargo al no utilizar ningún tipo de filler los valores mínimos no son alcanzados. Razón por la cual, para este caso en particular, no es una opción factible estabilizar una base espumada sin una adición de filler activo, tal como se pudo apreciar en la sección **DISEÑO NIVEL I**.

Por otra parte, la segunda particularidad es que, al analizar el comportamiento de las muestras $ITS_{EQUI-SATURADAS}$ sin filler activo, es posible apreciar que las probetas no presentan una Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS, por sus siglas en inglés). Por tal razón es posible concluir que la mezcla de asfalto espumada es susceptible a la humedad. Lo cual concuerda con Jenkins en el año 2000, donde menciona que los agregados no se encuentran recubiertos totalmente de cemento asfáltico, por lo que la relación de vacíos y la permeabilidad son mayores, lo que se traduce en una mayor sensibilidad a la presencia de humedad.

6.2 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE FILLER ACTIVO EN EL DESEMPEÑO MECÁNICO NIVEL III

Además de conocer los valores de Cohesión y Ángulo de Fricción de la Mezcla II con 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal, se opta por analizar el comportamiento que se hubiese tenido, en el supuesto que en el Nivel I, la susceptibilidad a la humedad estuviera en función del 1% cemento.

Con base en lo anterior y continuando con la investigación del comportamiento mecánico del Nivel II utilizando la Mezcla II se opta por utilizar el 2.4% de asfalto espumado requerido en el Nivel II, pero esta vez sustituyendo el 1% de cal por 1% de cemento, los resultados de la prueba triaxial, son mostrados a continuación en la Figura 6.5.

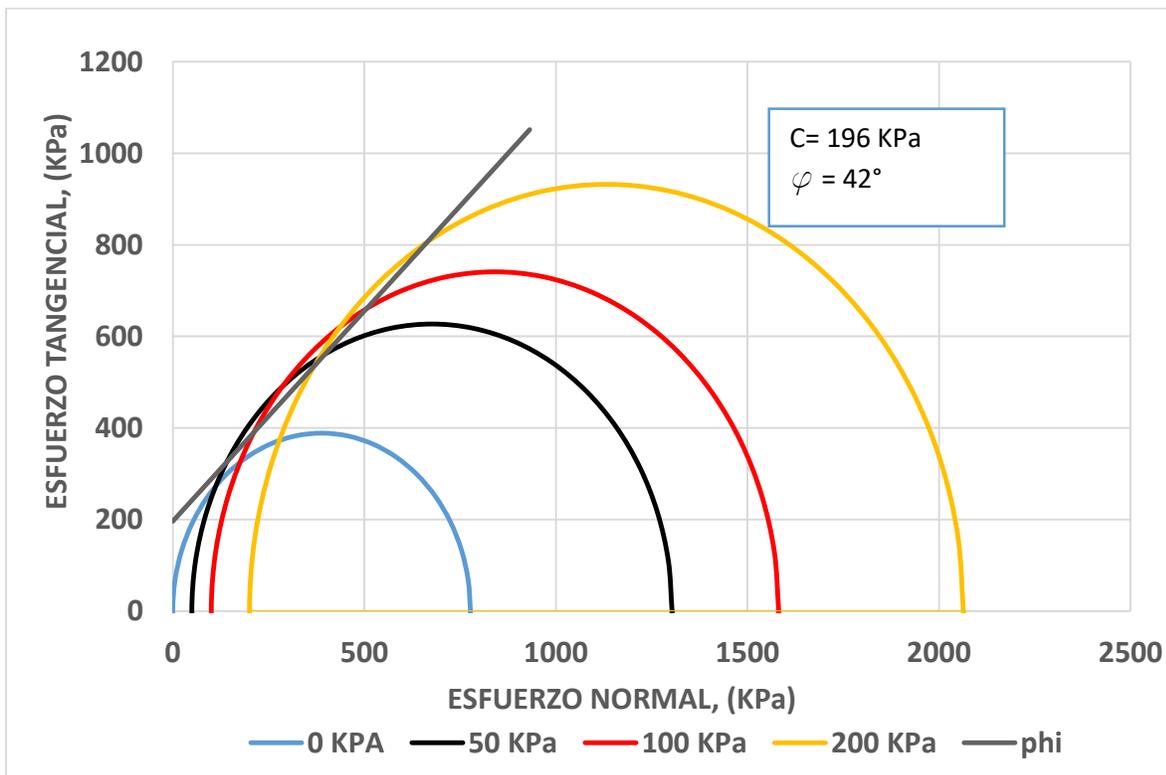


Figura 6.5 Cohesión y Fricción para 2.4% de Asfalto espumado y 1% de Cemento.

En la figura mostrada anteriormente, se aprecia el comportamiento de la envolvente de falla, la cual es uniforme, debido a que los círculos de Mohr se mantienen uniformes. Así también, es posible visualizar que el valor de cohesión se encuentra en el orden de 200 KPa. Por lo tanto, es posible concluir que, al utilizar 1% de cemento con asfalto espumado el valor de cohesión de la mezcla se reduce en un 15%; Además de lo anterior, aunado a la reducción del valor de cohesión (C), el del ángulo de fricción interna (ϕ)

también presenta una disminución, sin embargo este último, se mantiene por encima del valor mínimo requerido (40°).

No obstante, aun analizando los valores obtenidos para las pruebas triaxiales con 1% de cemento y 1% de cal, se opta por elaborar especímenes triaxiales sin filler activo con el propósito de conocer el comportamiento mecánico de la mezcla y visualizar así la influencia de la variación del filler activo sobre la misma. Se realiza entonces una última prueba en la cual no se añade filler activo, para que del mismo modo sea posible determinar los valores de cohesión y fricción del material.

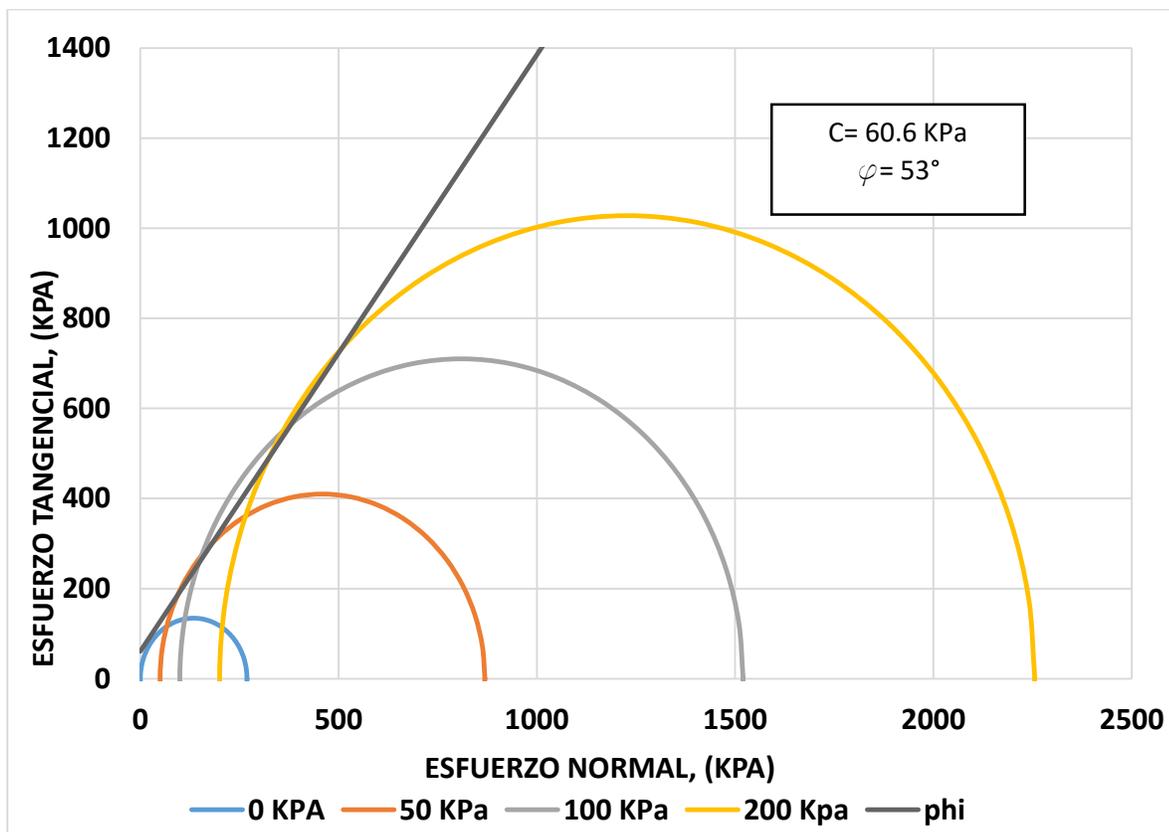


Figura 6.6 Cohesión y Fricción para 2.4% de Asfalto espumado sin filler activo.

De la figura anterior, es posible visualizar que la pendiente de la envolvente de falla incrementa, razón por la cual el valor del ángulo de fricción aumenta (52°), mientras que por otro lado, el valor de cohesión se ve reducido en un 75% en comparación con el material utilizando 1% de Cal (60KPa vs 240 KPa). De este modo, se concluye que, al no utilizar filler activo en una mezcla con poca cantidad de finos, el material estabilizado tiende

a tener un comportamiento bajamente cohesivo. Por lo que, para alcanzar el valor mínimo requerido de cohesión para el Nivel III, se requiere aumentar la cantidad de finos en la mezcla o añadir filler activo para compensar dicho déficit.

6.2.1 DISCUSIÓN PARTICULAR

Ha sido posible apreciar que para el presente material analizado, los valores de C y φ se encuentran en función del filler activo utilizado. Por lo que a continuación, se grafican simultáneamente los parámetros obtenidos en las pruebas triaxiales elaboradas, con el propósito de analizar su comportamiento, véase Figura 6.7.

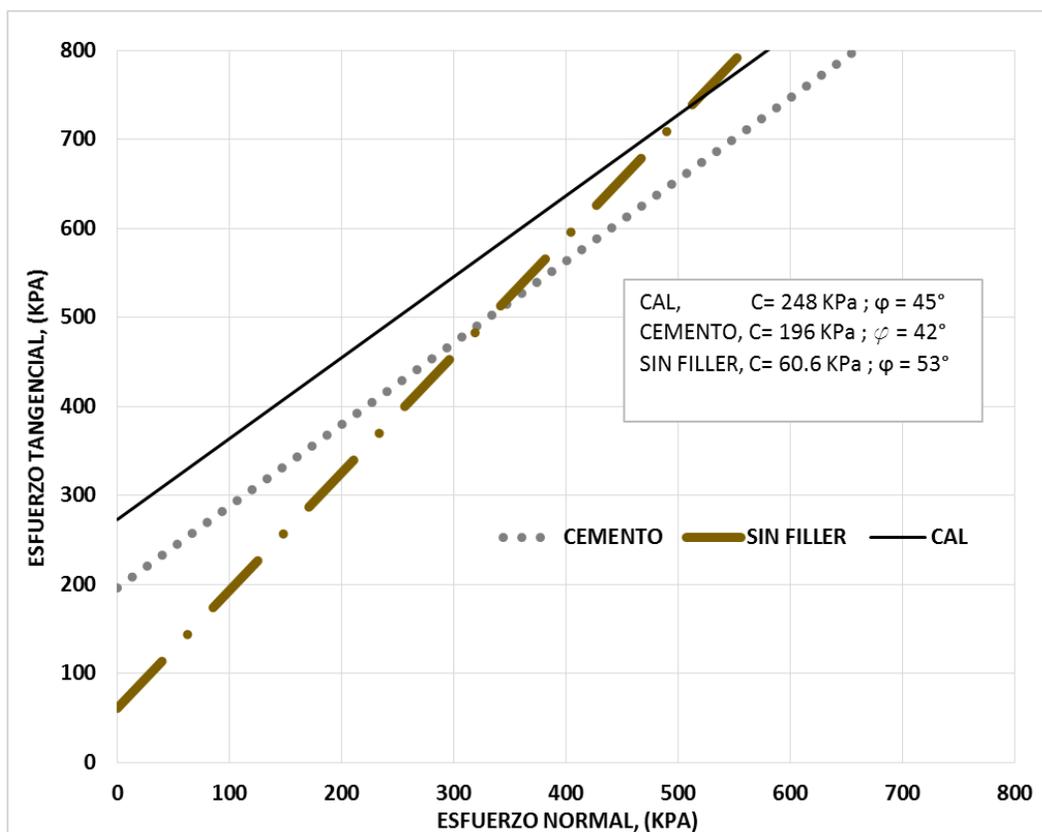


Figura 6.7 Influencia del filler activo en los parámetros de Cohesión y Fricción para 2.4% de Asfalto Espumado.

En la figura anteriormente mostrada, se aprecia que el valor de cohesión mínimo se obtiene al no utilizar filler activo y 2.4% de asfalto espumado, mientras que el valor máximo alcanzado se obtiene al utilizar 1% de Cal y 2.4% de asfalto espumado, sin embargo, éste último se encuentra apenas por debajo del valor mínimo requerido. Con ello, es posible concluir que aunque la cohesión dependa de la cantidad y porcentaje de finos de la mezcla,

es posible aumentar dicha propiedad añadiendo filler activo a la estabilización de asfalto espumado, mejorando así dicho comportamiento. Sin embargo, hay que tener en cuenta que para el presente Nivel III, ya se analizó con antelación dentro del Nivel I la posible susceptibilidad de la mezcla y el mejor filler activo a utilizar para la mezcla en diseño.

No menos importante es insistir en que, la cantidad de filler activo a añadir en una estabilización con asfalto espumado es del 1%, debido que al añadir más cantidad, propicia a una rigidez de la misma, impidiendo así el comportamiento de una mezcla estabilizada con unión discontinua.

Aunado al análisis de cohesión, también es importante mencionar que al utilizar un filler activo los valores de fricción son afectados en una disminución del mismo, sin embargo dentro del presente estudio, es posible apreciar que en las tres condiciones el valor de φ se encuentra por encima del parámetro mínimo requerido.

6.3 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE FILLER ACTIVO Y CANTIDAD DE ASFALTO ESPUMADO EN EL DESEMPEÑO MECÁNICO DE MÓDULO DE RESILIENCIA

Adicional a la investigación mostrada en el apartado **INDICADOR PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS, MÓDULO DE RESILIENCIA**, se pretende conocer el valor de Módulo de Resiliencia que se hubiese suscitado al variar el filler activo, es decir, utilizar 2.4% de A.E. con 1% de cemento, así como el valor de 2.4% de A.E. sin filler activo. Lo anterior se expresa mediante la Tabla 6.3 mostrada a continuación.

Tabla 6.3 Elaboración de los diferentes tipos de especímenes variando filler activo.

CONTENIDO DE ASFALTO ESPUMADO (%)	MATERIAL MEZCLA II RAP+REC (80%) + VIRGEN (20%)
2.40%	CAL
	CEMENTO
	SIN FILLER

Los resultados obtenidos al variar el filler activo se presentan a continuación en la Figura 6.8

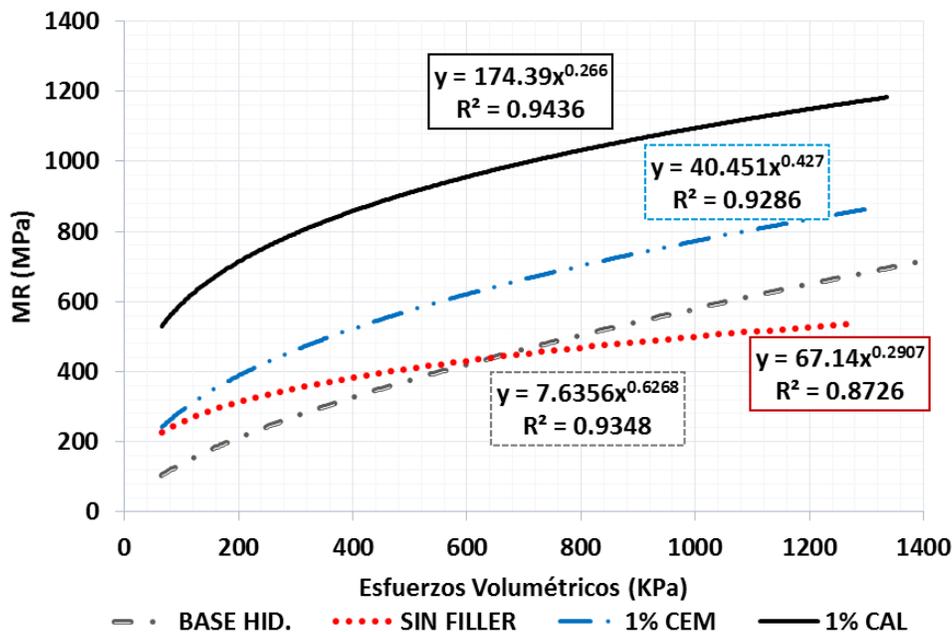


Figura 6.8 Efecto del Filler en el M_R con 2.4% de Asfalto Espumado.

Del gráfico anterior es importante señalar que para cada una de las curvas de M_R el valor de confiabilidad se encuentra en el orden de 90% o superior. Lo que se traduce en una correcta ejecución de la prueba y una respuesta adecuada del espécimen, por lo que es posible graficar una tendencia de la respuesta ante la deformación elástica recuperable. Asimismo es posible apreciar los valores de M_R de una base Hidráulica convencional (línea gris) en comparación con una base estabilizada con 2.4% de asfalto espumado sin filler activo (línea roja), así como la influencia de los diferentes filler activos aunados a la tecnología del asfalto espumado. En primera instancia se visualiza que al utilizar asfalto espumado se incrementa el valor de M_R a bajos esfuerzos Volumétricos (Θ) en comparación de una base hidráulica tradicional. Adicional a lo anterior, al estabilizar con asfalto espumado y 1% de cemento (línea azul) se incrementa el valor de M_R en aproximadamente un 49% en promedio al compararse con una base estabilizada con asfalto espumado y sin filler activo. Mientras que al utilizar asfalto espumado con 1% cal (línea negra) como filler activo se alcanza incrementar el valor de M_R hasta 136% en promedio. Lo que se traduce en un mejor comportamiento al esfuerzo-deformación al utilizar filler activo, de tal modo que es posible concluir que el mejor comportamiento de filler activo se presenta al utilizar 1% de cal, caso similar al Diseño Nivel I, II y III.

Además de lo anterior es de suma importancia conocer los rangos de valores de M_R en los que un material estabilizado con asfalto espumado podría fluctuar dependiendo del filler activo utilizado. Por ende, es posible realizar un correcto análisis y diseño de pavimentos, principalmente por el hecho de ahora conocer un valor del M_R real a partir de cualquiera de las líneas de tendencias antes mostradas. Dato fundamental para el diseño de pavimentos en México, debido que no se cuenta con algún modelo matemático o de correlación de un material estabilizado con asfalto espumado para estimar el valor de M_R . Principalmente por el hecho de que no existe correlación ninguna con algún parámetro existente del material analizado en relación al valor de M_R calculado. Lo anterior es que las únicas aproximaciones que se tienen para estimar los valores de M_R son principalmente solo de suelos cohesivos, los cuales se correlacionan con valores de Límites de consistencia, granulometría y/o CBR.

A continuación, se presenta otra variante adicional para conocer el valor de M_R al seleccionar el valor de 1% de cal como filler activo, sólo que para la presente ocasión se modifica la cantidad de asfalto espumado añadido para conocer así la influencia del asfalto espumado (véase Tabla 6.4) en el valor de Módulo de Resiliencia. Y que de esta manera sea posible conocer el comportamiento que la mezcla tiene al verse afectada por la disminución y/o aumento de la cantidad de asfalto espumado, véase Figura 6.9.

Tabla 6.4 Elaboración de los diferentes tipos de especímenes variando el contenido de asfalto espumado.

CONTENIDO DE ASFALTO ESPUMADO (%)	MATERIAL MEZCLA II RAP+REC (80%) + VIRGEN (20%)
2.3%	CAL
2.4%	
2.5%	

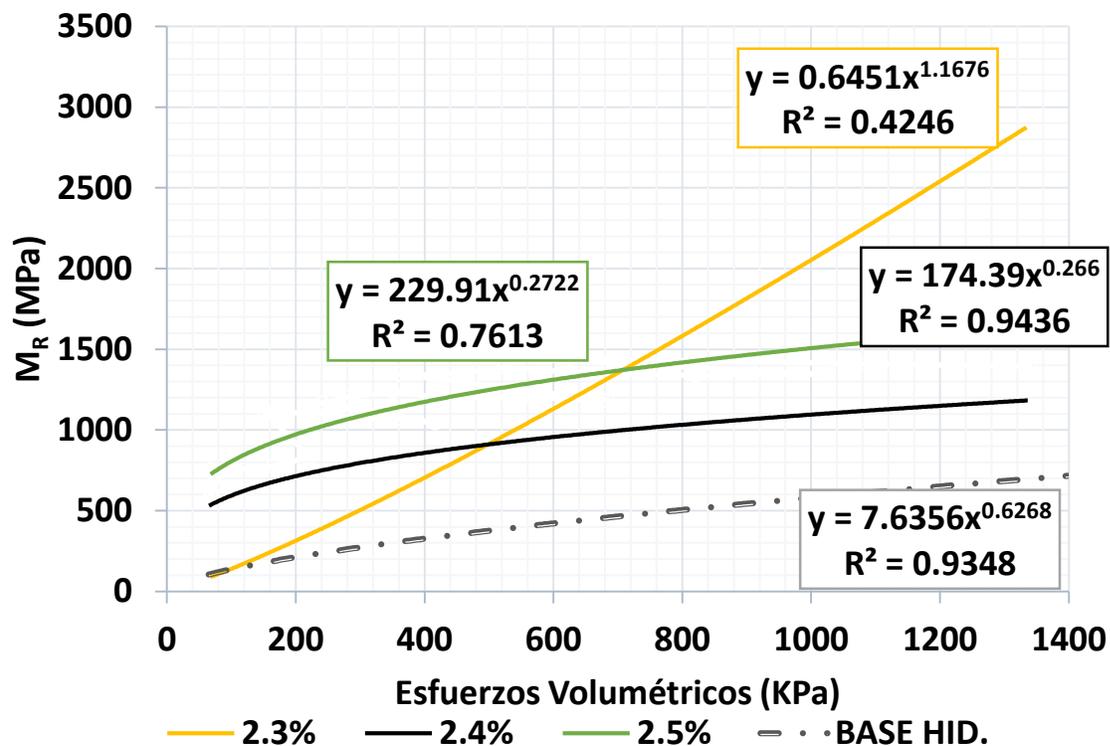


Figura 6.9 Efecto del Asfalto Espumado en el M_R con 1% de Cal.

La representación gráfica del comportamiento de Módulo de Resiliencia de la presente base estabilizada, demuestra que conforme se añade más asfalto espumado, el valor del M_R , aumenta. Del mismo modo, es posible apreciar que el valor de M_R de la base estabilizada con asfalto espumado en comparación con una base hidráulica tradicional, es superior, lo que permite concluir que utilizar dicho material estabilizado, conlleva a implementar un mejor material en la estructura de pavimentos, lo que representa una larga vida útil.

6.3.1 DISCUSIÓN PARTICULAR

Por lo anterior es posible concluir que el utilizar la cal como filler activo aumenta la cohesión del material sustancialmente, sin embargo al no utilizar ningún tipo de filler los valores mínimos no son alcanzados. Razón por la cual, para este caso en particular, no es una opción factible estabilizar una base espumada sin una adición de filler activo, tal como se pudo apreciar en la sección **NIVEL I.- FILLER ACTIVO**.

Por otra parte, la segunda particularidad es que, al analizar el comportamiento de las muestras $ITS_{EQUI-SATURADAS}$ sin filler activo, es posible apreciar que las probetas no presentan una Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS, por sus siglas en inglés). Por tal razón es posible concluir que la mezcla de asfalto espumada es susceptible a la humedad. Lo cual concuerda con Jenkins en el año 2000, donde menciona que los agregados no se encuentran recubiertos totalmente de cemento asfáltico, por lo que la relación de vacíos y la permeabilidad son mayores, lo que se traduce en una mayor sensibilidad a la presencia de humedad.

7. CONCLUSIÓN GENERAL

Al evaluar el desempeño de la espuma elaborada a partir del asfalto AC-20 producido en México, es viable aceptar su uso para la estabilización de materiales con la tecnología de asfalto espumado. Sin embargo, es primordial continuar monitoreando las propiedades espumantes del asfalto antes mencionadas durante la aplicación de la misma, principalmente por las posibles variaciones que el asfalto pudiese llegar a tener debido a los diferentes procesos de destilados del petróleo, así como la posible variación en el transporte y almacenamiento del asfalto.

Para la evaluación del desempeño del filler activo en la mezcla, es primordial seleccionar adecuadamente el mismo ya que de éste dependerá la susceptibilidad a la humedad de la mezcla. Ya que aún sin importar que se obtengan altos valores en la prueba de ITS en condición seca, fue posible apreciar en algunos casos que al evaluar la mezcla en condición saturada los valores de resistencia decaen considerablemente, razón por la cual es importante impedir a medida de lo posible reducir la susceptibilidad a la humedad de la mezcla verificando la posibilidad de utilizar filler activo.

Adicionalmente en complemento al manual de diseño existente, es importante mencionar que al utilizar asfalto espumado aunado con un correcto filler activo, es posible incrementar sustancialmente el valor de cohesión del material, lo cual se traduce en un mejoramiento inmediato del desempeño mecánico del material. No obstante, es importante mencionar también que el valor de fricción interna del material se ve reducido al estabilizarlo con la presente tecnología, sin embargo no se considera perjudicial, ya que éste último no se reduce drásticamente.

Al realizar los diferentes ensayos de Módulo de Resiliencia fue posible verificar que debido a los valores obtenidos al incorporar filler activo se encuentran por encima de una base tradicional utilizada para el diseño de pavimentos. Por ende, es posible potencializar el valor de MR de una mezcla de base hidráulica con RAP al estabilizarse con asfalto espumado, siendo así factible implementar una base estabilizada para el diseño de pavimentos. Así también, se observó que el valor de MR de la mezcla de asfalto espumado confirma que el proceso de diseño que se tiene como propuesta por la metodología de Wirtgen, es acorde al desempeño mecánico observado a lo largo de la presente

investigación, siendo entonces aplicable un nuevo parámetro de desempeño mecánico el cual permita utilizar dicha mezcla en el diseño de pavimentos en México.

Se considera que el uso de la presente tecnología comience a progresar paulatinamente dentro del territorio Mexicano, sin embargo para implementar la utilización de un material recuperado (RAP) y estabilizado con asfalto espumado, es necesario vigilar y controlar el desempeño mecánico que tiene mezcla enfocándose esencialmente en condiciones de humedad, ya que a lo largo de la investigación ha sido posible apreciar el papel que juega la susceptibilidad a la humedad de la misma. Ya que aun cuando es posible obtener muy buenos valores de desempeño, los mismos pueden ser drásticamente reducidos al presentarse humedad en la mezcla.

Al evaluar visualmente las diferencias entre las pruebas de probetas elaboradas con asfalto espumado con 1% de cal como filler activo en comparación de 1% de cemento. Fue posible apreciar que los corazones de las probetas que contenían el 1% de cal se mantuvieron prácticamente secos en comparación de las probetas que tenían 1% de cemento o no tenían filler activo.

Para conocer el desempeño mecánico de las mezclas analizadas en la presente investigación, principalmente se requirió cumplir con los límites granulométricos propuestos por la metodología Wirtgen. No obstante, aun cumpliendo dichos parámetros granulométricos, al utilizar un alto porcentaje de material RAP, se observa que se dificulta la extracción del espécimen después de haberse compactado, llegándose inclusive a presentar un desmoronamiento del mismo; lo cual, se traduce en una baja cohesión del material, por lo que para un alto porcentaje de material RAP será necesario la implementación de filler activo en la mezcla estabilizada de asfalto espumado. Adicional a lo anterior, el uso de materiales 100% producto de trituración se traduce en una baja cohesión, por lo cual será necesario analizar la posible adición de filler activo.

8. LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

Debido a la posible disminución de la susceptibilidad a la humedad en gran medida al utilizar filler activo, se considera de suma importancia monitorear en un tramo de prueba las deflexiones (deformación permanente) que el material estabilizado pudiese presentar, y poder así monitorear los mismos durante su vida útil.

Mientras que respetando las propuestas granulométricas actuales, es viable conocer el comportamiento mecánico de la base estabilizada con asfalto espumado al variar el origen del agregado utilizado, es decir, conocer la variación de las propiedades de cohesión del material debido al cambio de arenas y finos producto del intemperismo natural del agregado y/o de trituración.

9. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (1993). American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO Guide*. Washington, D.C.
- Abbas, A., Ali, A., Nazzal, M., Alhassan, A., Roy, A., & Powers, D. (2013). *Effect of temperature reduction, foaming water content, and aggregate moisture content on performance of foamed warm mix asphalt*, 48, 1058–1066. *Construction and Building Materials*.
- Abdullah, G. M., & Al-Abdul, H. I. (2015). Evaluation of foamed sulfur asphalt stabilized soils for road applications. 88, 149–158. *Construction and Building Materials*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.013>
- Amber, Y., & Von Quintus, H. (Octubre de 2002). U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration. *Study of LTPP Laboratory Resilient Modulus Test Data and Response Characteristics. Final Report, (FHWA-RD- 02-051)*.
- Aschenbrener, T. (10 de Septiembre de 2013). Federal Highway Administration. *Asphalt Pavement In-Place Recycling Techniques*. Schaumburg, Illinois, Estados Unidos de América. Obtenido de <https://www.pavementpreservation.org/conferences/regional-in-place-recycling-conferences/2013-midwestern-states-in-place-recycling-conference/?vid=08>
- Asphalt Academy. (2009). *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials* (Segunda ed.). Pretoria, South Africa: Asphalt Academy. doi:ISBN 978-0-7988-5582-2
- Asphalt Academy. (2009). TG2. *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials, 2*. Pretoria, South Africa: Asphalt Academy. doi:ISBN 978-0-7988-5582-2
- ASTM C136 / C136M - 14. (2014). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. American Society for Testing Materials. doi:10.1520/C0136_C0136M-14
- ASTM C702 / C702M - 11. (2011). *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. American Society for Testing Materials. doi:10.1520/C0702_C0702M-11
- ASTM D3418-15. (2015). *Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry*. American Society for Testing Materials. doi:10.1520/D3418-15
- ASTM D36 / D36M - 09. (2009). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. American Society for Testing Materials. doi:10.1520/D0036_D0036M-09
- ASTM D5 / D5M - 13. (2013). *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. American Society for Testing Materials. doi:0.1520/D0005_D0005M-13
- ASTM D6348 - 12e1. (2012). *Standard Test Method for Determination of Gaseous Compounds by Extractive Direct Interface Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy*. American Society for Testing Materials. doi:10.1520/D6348-12E01

- ASTM D6373-13. (2013). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. American Society for Testing Materials. doi:10.1520/D6373
- Aurstad, J., & Hoff, I. (2002). *Crushed Asphalt and Concrete as Unbound Road Materials: Comparisons of Field Measurements and Laboratory Investigations*. 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways, and Airfields.
- Austroroads Ltd. (2015). Technical Report AP-T303-15. *Design and Performance of Foamed Bitumen Stabilised Pavements: Progress Report 3*. Sydney, Australia.
- Barksdale, R. (1971). Highway Research Record, No. 345. *Compressive Stress Pulse Times in Flexible Pavements for Use in Dynamic Testing*. Highway Research Board.
- Betti, G., Airey, G., Jenkins, K., Marradi, A., & Tebaldi, G. (2016). *Active fillers' effect on in situ performances of foam bitumen recycled mixtures*, 281-296. Road Materials and Pavement Design. No. 17. doi:10.1080/14680629.2016.1213486
- Brock, J., & Richmond, J. (2007). *Technical Paper T-127 - Milling And Recycling*. Astec Industries Company. Obtenido de <http://www.astecinc.com/images/file/literature/Astec-T-127-Milling-Recycling-EN.pdf>
- Buchanan, S. (2007). *Resilient Modulus: What, Why and How?* Vulcan Materials Company. Obtenido de <http://vulcaninnovations.com/public/pdf/2-Resilient-Modulus-Buchanan.pdf>
- Chan, S., Lane, B., Kazmierowski, T., Raymond, C., & Lee, W. (2009). *Comparative Performance of Conventional Cold In-place Recycling to Cold In-place Recycling with Expanded Asphalt - Ontario's Experience*. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM. Recuperado el 29 de JUNIO de 2016, de <http://docs.trb.org/prp/10-1724.pdf>
- Chesner, W. H., Collins, R. J., & MacKay, M. H. (Abril de 1998). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. (P. N. FHWA-RD-97-148, Ed.) McLean, Virginia, U.S.A.: Federal Highway Administration. Obtenido de <http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/009686.pdf>
- Corro, S., Castillo, G., Ossa, A., Hernández, J., Mandujano, D., Hernández, F., & Arizaga, S. U. (2014). *Dispav-5 Versión 3.0: Actualización del sistema para el diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones*. Instituto de Ingeniería UNAM. Obtenido de <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/BuscarPublicacion.aspx?id=4972>
- Csanyi, L. (1957). *Foamed Asphalt in Bituminous Paving Mixes*, 108-122. Highway Research Board Bulletin Volume 10 No. 160.
- Dal Ben, M., & Jenkins, K. J. (2014). *Performance of cold recycling materials with foamed bitumen and increasing percentage of reclaimed asphalt pavement*, 15:2, 348-371. Road Materials and Pavement Design. doi:10.1080/14680629.2013.872051
- Dunlap, W. (1963). Technical Report 1, Project 2-8-62-27, TTI. *A report on a mathematical model describing the deformation characteristics of granular materials*. U.S.A.: Texas A & M University.
- EAPA. (2016). *European Asphalt Assosiation*. Obtenido de <http://www.eapa.org/>

- Fernández, A. F., & Blanco, M. E. (2015). *Asfalto Espumado: Un caso de éxito de reutilización de materiales en proyectos carreteros en México*. México: Asfáltica Revista Técnica. No. 42.
- Fleming, P. R. (1998). *Recycled Bituminous as Unbound Granular Materials for Road Foundations in the UK*. Proc., 5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields.
- Fu, P., Jones, D., Harvey, J. T., & Bukhari, S. A. (2010). *Laboratory testing methods for foamed asphalt mix resilient modulus*, 10, 187-212. Road Materials and Pavement Design. doi:10.1080/14680629.2009.9690187
- Garnica, P., Gómez, J., & Sesma, J. (2002). Publicación Técnica No. 197. *Mecánica de Materiales Para Pavimentos*. Sanfandila, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Garnica, P., Pérez, N., & Gómez, J. (2000). Publicación Técnica No. 142. *Módulos De Resiliencia En Suelos Finos Y Materiales Granulares*. Sanfandila, Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.
- George, K. (Agosto de 2004). Mississippi Department of Transportation. Federal Highway Administration. *Prediction of resilient modulus from soil index properties. Final report*.
- Hailesilassie, B. W., Jerjen, I., Griffa, M., & Partld, M. (2016). *A closer scientific look at foam bitumen*. Road Materials and Pavement Design. No. 18. doi:10.1080/14680629.2016.1213513
- He, G.-P., & Wong, W.-G. (2006). *Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials*, 30-40. Construction and Building Materials 22. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.06.033
- He, G.-P., & Wong, W.-G. (2007). *Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials*, 1809-1819. Construction and Building Materials 21. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.024
- Huang, Y. H. (1993). University of Kentucky. *Pavement Analysis and Design*. U.S.A.: Prentice Hall Inc.
- INEGI. (2016). Instituto Nacional De Estadística Y Geografía. *Vehículos de motor registrados en circulación; Periodo 2010-2016*. Recuperado el 20 de JULIO de 2016, de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/?idserpadre=10900530&d10900530#D10900530>
- Izaks, R., Haritonovs, V., & Zaumanis, M. (2015). Bituminous Mixtures and Pavements VI. *First trial to design up to 50% recycled hot mix asphalt in Latvia*, 545. (C. P. 2015, Ed.) London, United Kingdom: A.F. Nikolaides. doi:10.1201/b18538-2
- Jenkins, K. J. (1994). Analysis of a pavement layer which has been treated by single pass in situ stabilisation. Masters Degree thesis, University of Natal.
- Jenkins, K. J. (2000). *Mix Design Considerations for Cold and Half-warm Bituminous Mixes with emphasis on Foamed Bitumen*. PhD Dissertation Stellenbosch University.
- Jenkins, K. J., Lindsay, R. L., & Rossmann, D. R. (1995). The deep in situ stabilisation process: case study, Annual Traffic Convention (ATC). 1–13. Pavement Engineering I 3A, Paper 7.

- Jenkins, K. J., Ebels, L. J., Kelfkens, R., Mathaniya, E., Moloto, P., & Mulusa, W. (Septiembre de 2008). *Updating Bituminous Stabilized Materials Guidelines: Mix Design Report Phase II*. Stellenbosch, South-Africa.
- Jenkins, K. J., Long, F. M., & Ebels, L. J. (2007). International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, No. 2. *Foamed bitumen mixes = shear performance?*, 85–98. Taylor & Francis. doi:10.1080/10298430601149718
- Jenkins, K. J., Van de Ven, M., & De Groot, J. (1999). *Characterization of foamed bitumens*. Zimbabwe, Sudáfrica: 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA).
- Kim, W., Labuz, J. F., & Dai, S. (2007). *Resilient Modulus of Base Course Containing Recycled Asphalt Pavement*. Washington: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. doi:10.3141/2005-04
- Lane, B., Kazmierowski, T., & Alkins, A. (2008). Sustainable Pavements: Environmental, Economic, and Social Benefits of In Situ Pavement Recycling. En T. R. Academies, *Transportation Research Records: Journal of the Transportation Research Board No. 2084* (págs. 100-103). Washington, DC, U.S.A. doi:10.3141/2084-11
- Lee, K. W., & Davis, J. (1998). *Structural Properties of New England Subbase Materials of Flexible Pavements*. 5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields.
- Lesueur, D., Clech, H., Brosseaud, A., Such, C., Cazacliu, B., Koenders, B., . . . Bonvallet, J. (2004). Foamability and Foam Stability. En *Road Materials and Pavement Design* (3 ed., Vol. 5, págs. 277-302). doi:10.1080/14680629.2004.9689973
- Marek, I., & Anna, C.-K. (2013). *Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology*, 57. Modern Building Materials, Structures and Techniques. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.056
- May, R. W., & Witczak, M. W. (1981). Transportation Research Record 810, TRB, National Research Council. *Effective Granular Modulus to Model Pavement Response*. Washington, D.C., U.S.A.
- M-MMP-1-07/07. (2007). *Límites de Consistencia*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Obtenido de <http://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-07-07.pdf>
- M-MMP-1-09/06. (2006). *Compactación AASHTO*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- Moossazadeh, J., & Witczak, M. W. (1981). Transportation Research Record 810, National Research Council. *Prediction of Subgrade Moduli for Soil that Exhibits Nonlinear Behavior*. Washington, D.C., U.S.A.
- Mulusa, W. K. (2009). *Development Of A Simple Triaxial Test For Characterising Bitumen Stabilised Materials*. Universidad de Stellenbosch: Thesis Master Science Engineering, Civil Engineering.
- NCHRP. (2000). Development of the 2002 Design Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. *Unbound Materials Characterization Utilizing LTPP Data, Unpublished Interim Task Report Project 1-37-A*. Washington, D.C., U.S.A.

- NCHRP. (2002). Development of the 2002 Design Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures: Phase II. *NCHRP 01-37A [Completed]*. Obtenido de <http://apps.trb.org/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=218>
- NCHRP. (2004). *Project 1-28A Harmonized Test Methods for Laboratory Determination for Flexible Pavement Design*. Washington, D.C., U.S.A.: National Cooperative Highway Research Program.
- NCHRP. (2011). *Recycling and Reclamation of Asphalt Pavements Using In-Place Methods(421)*. Washington, D.C., U.S.A.: National Cooperative Highway Research Program. doi:<http://dx.doi.org/10.17226/14568>
- N-CMT-4-05-004/05. (31 de 05 de 2005). Calidades de Materiales Asfálticos Grado PG. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- N-CMT-4-02-002/04. (15 de 11 de 2004). Materiales para Bases Hidráulicas. México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
- N-CMT-4-02-003/04. (15 de 11 de 2014). *Materiales para Bases Tratadas*. México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
- Newcomb, D. E., Brown, E., & Epps, J. A. (2007). *Designing HMA Mixtures with High RAP Content. A Practical Guide*. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association. Obtenido de http://driveasphalt.org/assets/content/resources/QIP-124_Designing_HMA_Mixtures_with_High_RAP_Contentweb.pdf
- Ovalle, H. S. (JULIO de 2015). Innovaciones En Construcción De Infraestructura Carretera. *IX Seminario de Ingeniería, Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres*. México: COCONAL Compañía Contratista Nacional, S.A. de C. V.
- Ozturk, H. I., & Kutay, M. E. (2013). *A Novel testing procedure for assessment of quality of foamed warm mix asphalt binders*. Journal of Materials in Civil Engineering. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000924
- Ozturk, H., & Kutay, E. (2012). *Investigation of Moisture Dissipation in Foam-Based Warm Mix Asphalt Using Synchrotron-Based X-Ray Microtomography*. Journal Of Materials In Civil Engineering. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000433
- Rafaelli, D. (2004). *Foamed Asphalt Base Stabilization*. Technology Transfer Program. Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley.
- Saleh, M. F. (2007). *Cost evaluation of foam bitumen and other stabilisation alternatives* (Vol. 8). Taylor & Francis.
- Saleh, M. F. (2007). Effect of rheology on the bitumen foamability and mechanical properties of foam bitumen stabilized mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 99-110. Taylor & Francis. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/10298430601149650>
- Seed, H. B., Mitry, F. G., Monismith, C., & Chan, C. K. (1967). NCHRP Report 35. *Prediction of pavement deflection from laboratory repeated load tests*. U.S.A.

- Shatec. (2013). *Cold In-Place Recycling With Expanded Asphalt Mix (CIR Eam/Foam) Technology*. Shatec Engineering Consultants, LLC. Obtenido de <http://fmgcoinc.com/wp-content/uploads/2014/03/WhitePaper-070113-Shakir.pdf>
- Stimilli, A., Ferrotti, G., Graziani, A., & Canestrari, F. (2013). Road Materials and Pavement Design. *Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt., 14 (suppl 1.)*, 149–161. doi:10.1080/14680629.2013.774752
- TXDOT. (2002). *Triaxial Compression for Disturbed Soils and Base Materials*. Texas Department of Transport.
- Uzan, J. (1992). *Resilient Characterization Of Pavement Materials*. U.S.A.: John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/nag.1610160605
- Wirtgen. (2004). *Wirtgen Cold Recycling Manual*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.
- Wirtgen. (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.
- Wirtgen. (3 de Junio de 2015). *Pavement Rehabilitation using the Wirtgen Cold Recycling Process*. Recuperado el 11 de Julio de 2016, de YouTube: <https://youtu.be/heLuTocxTog>
- Wirtgen. (2016). *Binder with a proven track worldwide*. Alemania: Wirtgen Group.
- Yu, X., Liu, S., & Dong, F. (2016). Comparative assessment of rheological property characteristics for unfoamed and foamed asphalt binder. *Construction and Building Materials* 122, 354-361.

10. ANEXOS

10.1 ANEXO A - Granulometrías, PVSM, Límites de Consistencia

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
OBRA <u>Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado</u>			ENSAYE <u>001</u>	
			FECHA <u>17/09/2015</u>	
MATERIAL <u>MATERIAL FRESADO (RAP + BASE HIDRÁULICA EXISTENTE)</u>				
TESISTA <u>DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ</u>				
RECIPIENTE PARA LA MUESTRA COMPLETA		RECIPIENTE PARA PASA MALLA N°4		
MASA <u>3,330</u> g	VOLUMEN _____ cm ³	MASA <u>38.5</u> g	VOLUMEN _____ cm	
MASAS DE LA :		CONTENIDO DE AGUA EN PASA LA MALLA N°4		
MUESTRA + RECIPIENTE <u>8,593</u> g		MUESTRA HÚMEDA + RECIPIENTE <u>200.0</u> g		
MUESTRA <u>5,263</u> g		MUESTRA SECA + RECIPIENTE <u>193.4</u> g		
FRACCIÓN RETENIDA EN MALLA N°4 <u>2,168</u> g		MASA DEL AGUA <u>6.6</u> g		
FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4 <u>3,095</u> g		CONTENIDO DE AGUA <u>3.41%</u> %		
CORRECCIÓN DE LA MASA DE LA MUESTRA POR HÚMEDAD				
FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4 <u>2,993</u> g		TOTAL DE LA MUESTRA <u>5,161</u> g		
MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA N°4				
MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA (g)	RETENIDO PARCIAL (%)	MATERIAL QUE PASA (%)
3"	75.00	0.0	0	100
2"	50.00	0.0	0	100
1 1/2"	37.50	0.0	0	100
1"	25.00	85.0	2	98
3/4"	19.00	95.0	2	97
1/2"	12.50	345.0	7	90
3/8"	9.50	388.0	8	82
1/4"	6.30	935.0	18	64
N°4	4.75	320.0	6	58
PASA		2,993	58	
SUMA		5,161	100	
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N°4				
MALLA N°	ABERTUR A (mm)	MASA RETENIDA (g)	RETENID O PARCIAL (%)	MATERIAL QUE PASA (%)
8	2.360	65.1	20	38
16	1.180	47.1	14	24
30	0.600	27.5	8	16
40	0.425	9.5	3	13
50	0.300	7.6	2	11
100	0.150	10.6	3	8
200	0.075	5.3	2	6
PASA		20.7	6	
SUMA		193.4	58	
		D10 <u>0.26</u>	D30 <u>1.65</u>	D60 <u>5.25</u>
		Cu <u>20.12</u>	Cc <u>1.99</u>	
RETENIDO EN 3" <u>0</u> %				
G <u>42</u> %				
S <u>52</u> %				
F <u>6</u> %				
PASA N°40 <u>13</u> %				
PESO VOLUMÉTRICO S.S <u>1417</u> kg/m ³				
CLASIFICACIÓN S.U.C.S (PRELIMINAR)				
Arena bien graduada con limo con grava SW SM				

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

OBRA	Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado	ENSAYE	002
		FECHA	17/09/2015

MATERIAL	MATERIAL DE BANCO 3/4"
TESISTA	DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ

RECIPIENTE PARA LA MUESTRA COMPLETA	RECIPIENTE PARA PASA MALLA N°4
MASA _____ g VOLUMEN _____ cm ³	MASA _____ g VOLUMEN _____ cm

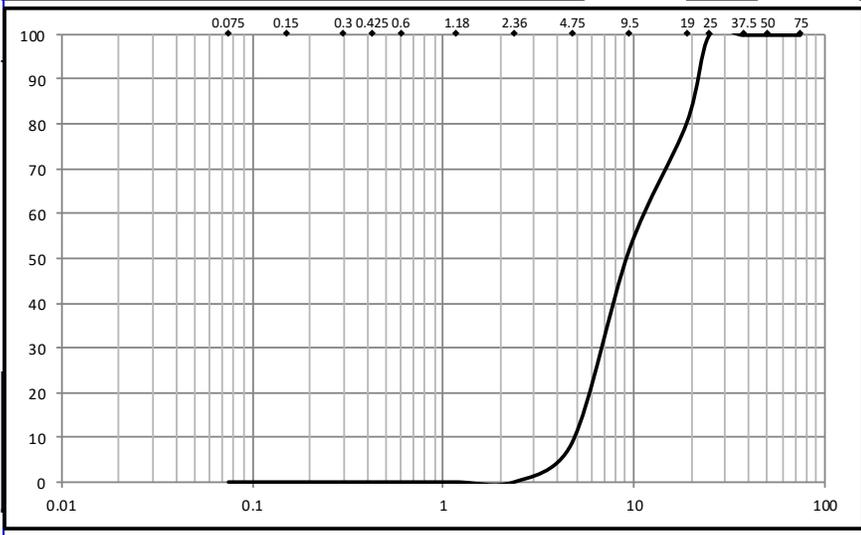
MASAS DE LA :	CONTENIDO DE AGUA EN PASA LA MALLA N°4
MUESTRA + RECIPIENTE _____ g	MUESTRA HÚMEDA + RECIPIENTE _____ g
MUESTRA 5,426 g	MUESTRA SECA + RECIPIENTE _____ g
FRACCIÓN RETENIDA EN MALLA N°4 4,952 g	MASA DEL AGUA _____ g
FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4 474 g	CONTENIDO DE AGUA _____ %

CORRECCIÓN DE LA MASA DE LA MUESTRA POR HÚMEDAD	
FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4 474 g	TOTAL DE LA MUESTRA 5,426 g

MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA N°4				
MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA (g)	RETENID O PARCIAL (%)	MATERIAL QUE PASA (%)
3"	75.00	0.0	0	100
2"	50.00	0.0	0	100
1 1/2"	37.50	0.0	0	100
1"	25.00	0.0	0	100
3/4"	19.00	0.0	0	100
1/2"	12.50	1,068.5	20	80
3/8"	9.50	1,549.7	29	52
1/4"	6.30	1,693.2	31	21
N°4	4.75	640.1	12	9
PASA		474	9	
SUMA		5,426	100	

MATERIAL QUE PASA LA MALLA N°4				
MALLA N°	ABERTUR A (mm)	MASA RETENIDA (g)	RETENID O PARCIAL (%)	MATERIAL QUE PASA (%)
8	2.360			
16	1.180			
30	0.600			
40	0.425			
50	0.300			
100	0.150			
200	0.075			
PASA		0.0		
SUMA		0.0	0	

D10 4.92 D30 7.27 D60 10.37



Cu	2.11	Cc	1.04
RETENIDO EN 3"	0	%	
G	91	%	
S	0	%	
F	0	%	
PASA N°40	0	%	

PESO VOLUMÉTRICO S.S
1466 kg/m³

CLASIFICACIÓN S.U.C.S
(PRELIMINAR)
Grava mal graduada GP

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

OBRA	Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado	ENSAYE	003
		FECHA	17/09/2015

MATERIAL	MATERIAL DE BANCO 1-1/2"
TESISTA	DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ

RECIPIENTE PARA LA MUESTRA COMPLETA		RECIPIENTE PARA PASA MALLA N°4	
MASA _____ g	VOLUMEN _____ cm ³	MASA _____ g	VOLUMEN _____ cm

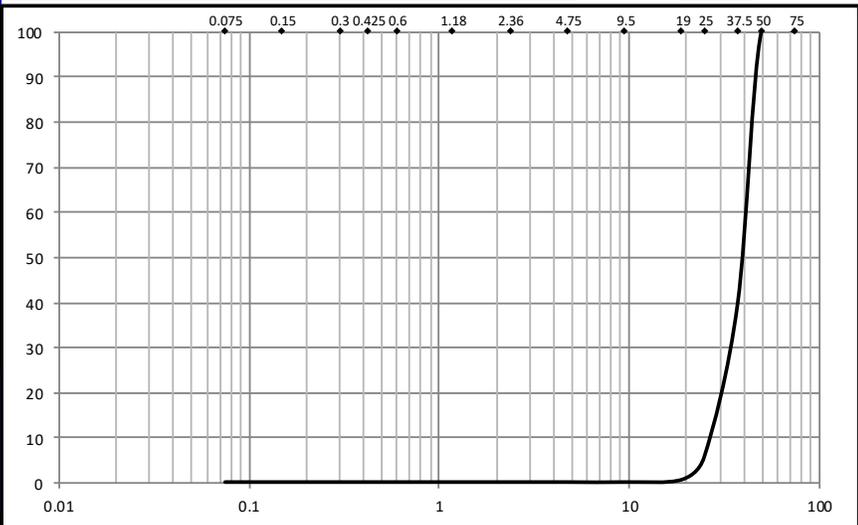
MASAS DE LA :		CONTENIDO DE AGUA EN PASA LA MALLA N°4	
MUESTRA + RECIPIENTE	10,983 g	MUESTRA HÚMEDA + RECIPIENTE	_____ g
MUESTRA	10,983 g	MUESTRA SECA + RECIPIENTE	_____ g
FRACCIÓN RETENIDA EN MALLA N°4	10,983 g	MASA DEL AGUA	_____ g
FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4	0 g	CONTENIDO DE AGUA	_____ %

CORRECCIÓN DE LA MASA DE LA MUESTRA POR HÚMEDAD			
FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA N°4	0 g	TOTAL DE LA MUESTRA	10,983 g

MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA N°4				
MALLA N°	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA (g)	RETENID O PARCIAL (%)	MATERIAL QUE PASA (%)
3"	75.00	0.0	0	100
2"	50.00	0.0	0	100
1 1/2"	37.50	0.0	0	100
1"	25.00	6,630.1	60	40
3/4"	19.00	3,742.1	34	6
1/2"	12.50	553.0	5	1
3/8"	9.50	32.0	0	0
1/4"	6.30	25.8	0	0
N°4	4.75		0	0
PASA		0	0	
SUMA		10,983	100	

MATERIAL QUE PASA LA MALLA N°4				
MALLA N°	ABERTUR A (mm)	MASA RETENIDA (g)	RETENID O PARCIAL (%)	MATERIAL QUE PASA (%)
8	2.360			0
16	1.180			0
30	0.600			0
40	0.425			0
50	0.300			0
100	0.150			0
200	0.075			0
PASA		0.0		
SUMA		0.0	0	

D10 19.78 D30 23.30 D60 29.22



Cu	1.48	Cc	0.94
RETENIDO EN 3"	0 %	G	100 %
S	0 %	F	0 %
PASA N°40	0 %		

PESO VOLUMÉTRICO S.S
1371 kg/m³

CLASIFICACIÓN S.U.C.S
(PRELIMINAR)
Grava mal graduada GP

PRUEBA DE COMPACTACIÓN DINÁMICA

OBRA	Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado	ENSAYE	005
		FECHA	18/09/2015

MATERIAL MEZCLA MATERIAL FRESADO (80%) Y MATERIAL DE BANCO T.M.A. 1 1/2" (20%)

TESISTA DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ

MÉTODO AASHTO MODIFICADA MOLDE 1 MASA 3500.6 g
 VARIANTE D No. DE CAPAS 5 GOLPES POR CAPA 56

		1	2	3	4	5	6
CONTENIDO DE AGUA	CÁPSULA NÚMERO	E1	E2	E3	E4		
	MASA CÁPSULA + SUELO HÚMEDO, (g)	304.5	176.3	172.2	211.0		
	MASA CÁPSULA + SUELO SECO, (g)	299.8	168.8	163.8	201.0		
	MASA DEL AGUA, (g)	4.7	7.5	8.4	10.0		
	MASA CÁPSULA, (g)	204.5	75.3	72.2	111.0		
	MASA SUELO SECO, (g)	95.3	93.5	91.6	90.0		
	CONTENIDO DE AGUA, (%)	4.9	8.0	9.2	11.1		
MASA VOLÚMETRICA	MASA DEL MOLDE + SUELO HÚMEDO, (g)	7917	8271	8262	8084		
	MASA DEL MOLDE, (g)	3501	3501	3501	3501		
	MASA SUELO HÚMEDO, (g)	4416	4770	4761	4584		
	VOLÚMEN DEL MOLDE, (cm ³)	2123	2123	2123	2123		
	PESO VOLÚMETRICO HÚMEDO, (kg/m ³)	2080	2247	2243	2159		
	PESO VOLÚMETRICO SECO, (kg/m ³)	1982	2080	2054	1943		



PESO VOLÚMETRICO SECO MÁXIMO 2080 kg/m³ HUMEDAD ÓPTIMA 8.0 %

DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE CONSISTENCIA

OBRA Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado

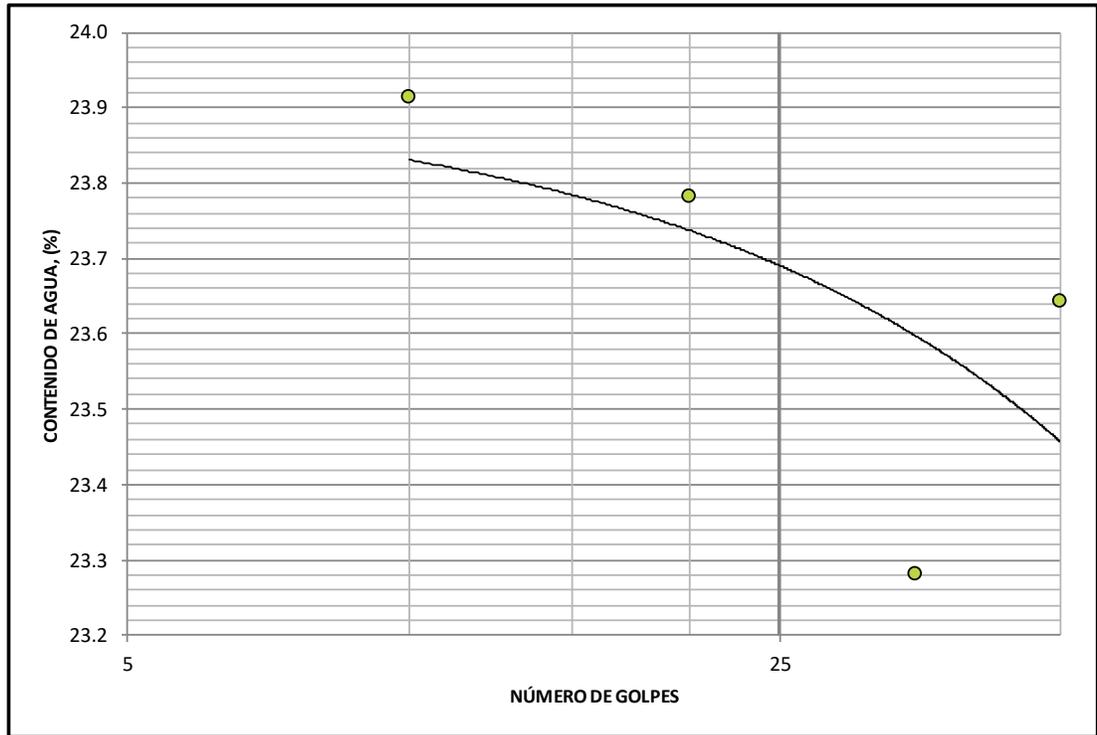
ENSAYE 005
FECHA 21/09/2015

MATERIAL MEZCLA MATERIAL FRESADO (80%) Y MATERIAL DE BANCO T.M.A. 1 1/2" (20%)

TESISTA ING. DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ

	NÚM DE GOLPES	VIDRIO DE RELOJ No.	TARA + SUELO	TARA + SUELO SECO	MASA DEL AGUA (g)	TARA (g)	MASA SUELO SECO (g)	CONTENIDO DE AGUA (%)
LÍMITE LÍQUIDO	50	1	38.69	36.12	2.57	25.25	10.87	23.6
	35	2	39.20	36.49	2.71	24.85	11.64	23.3
	20	3	38.48	35.40	3.08	22.45	12.95	23.8
	10	4	42.95	39.15	3.80	23.26	15.89	23.9

LÍMITE PLÁSTICO	A	28.45	25.27	3.18	8.00	17.27	18.4



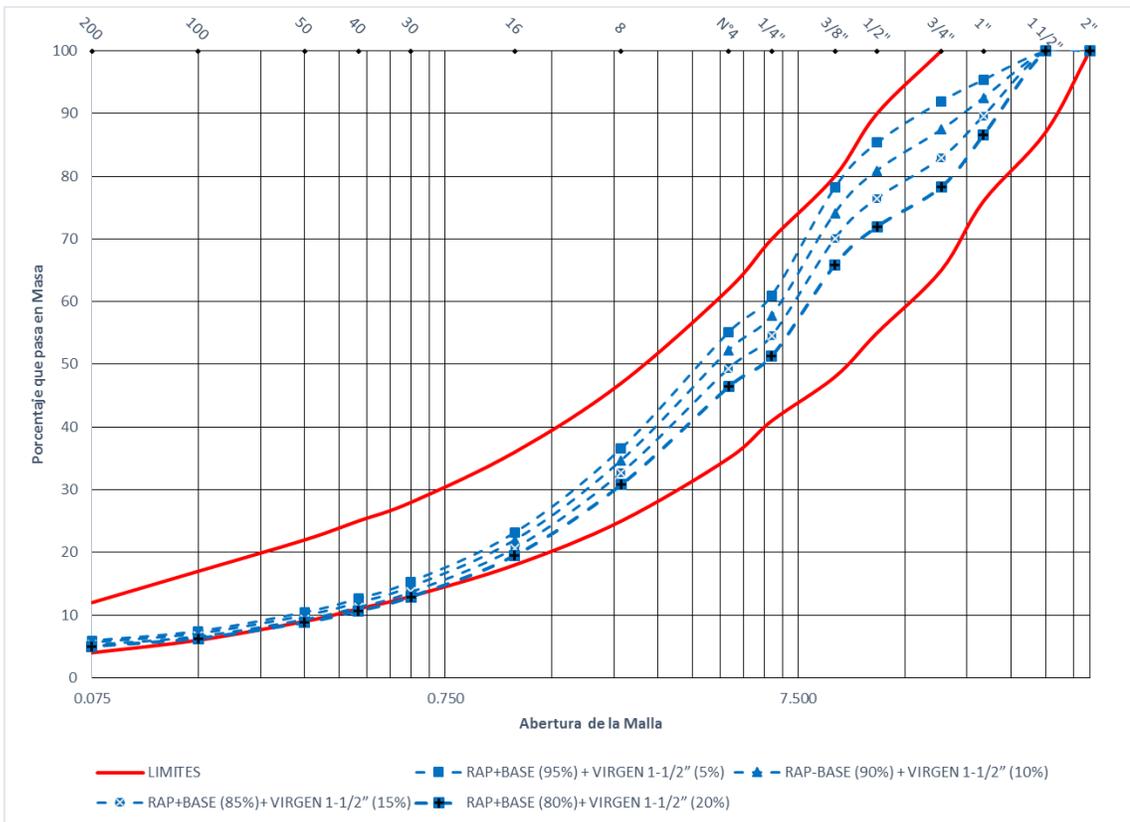
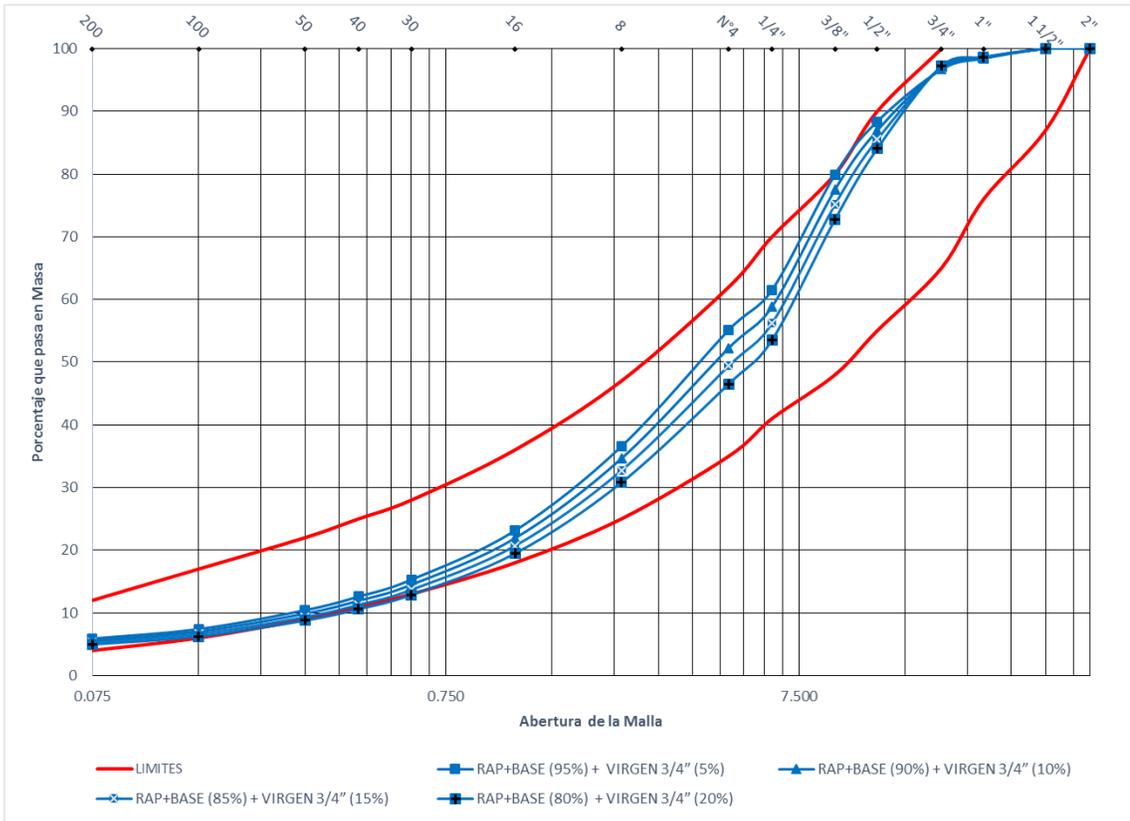
LÍMITE LÍQUIDO 23.61 %

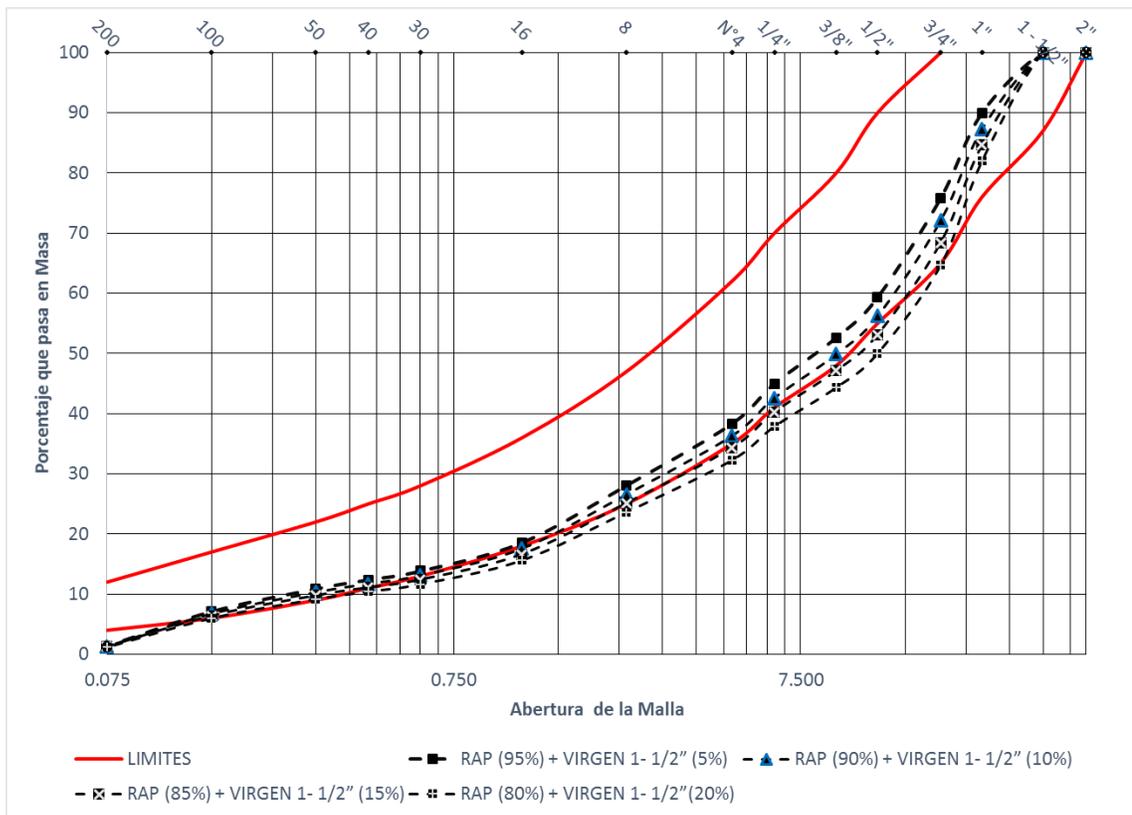
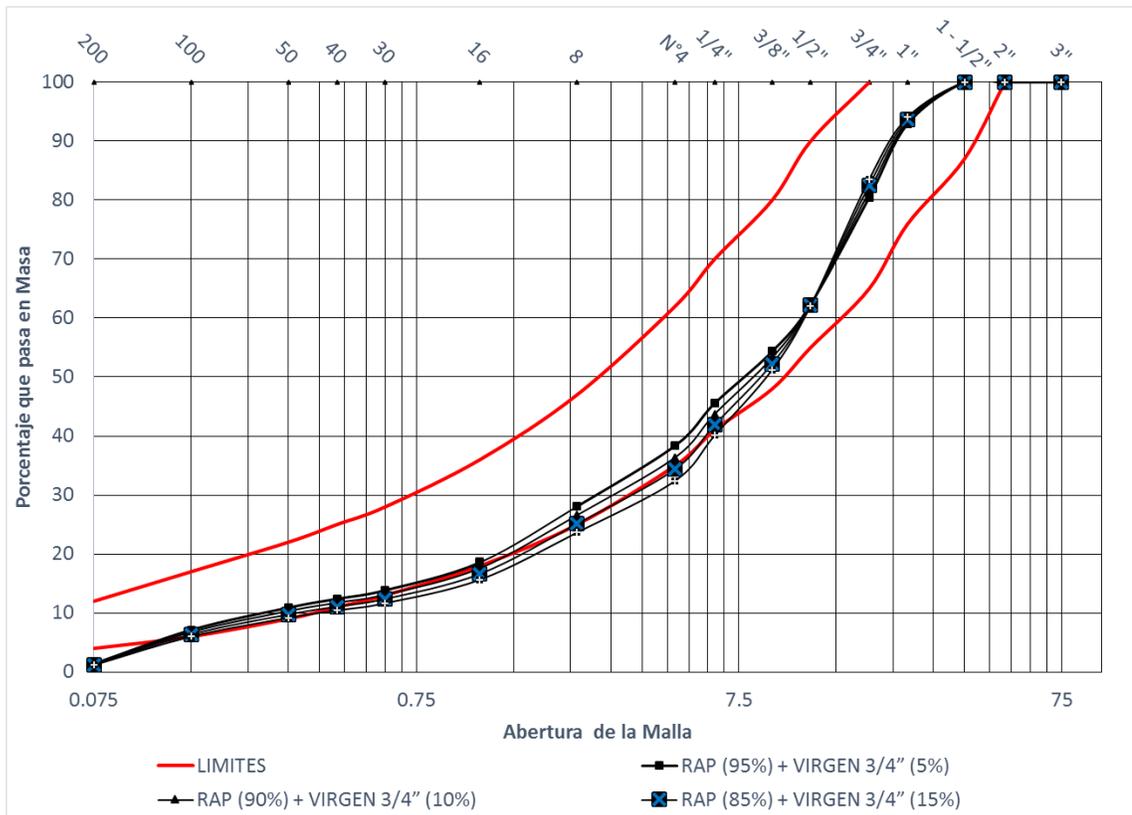
LÍMITE PLÁSTICO 18.41 %

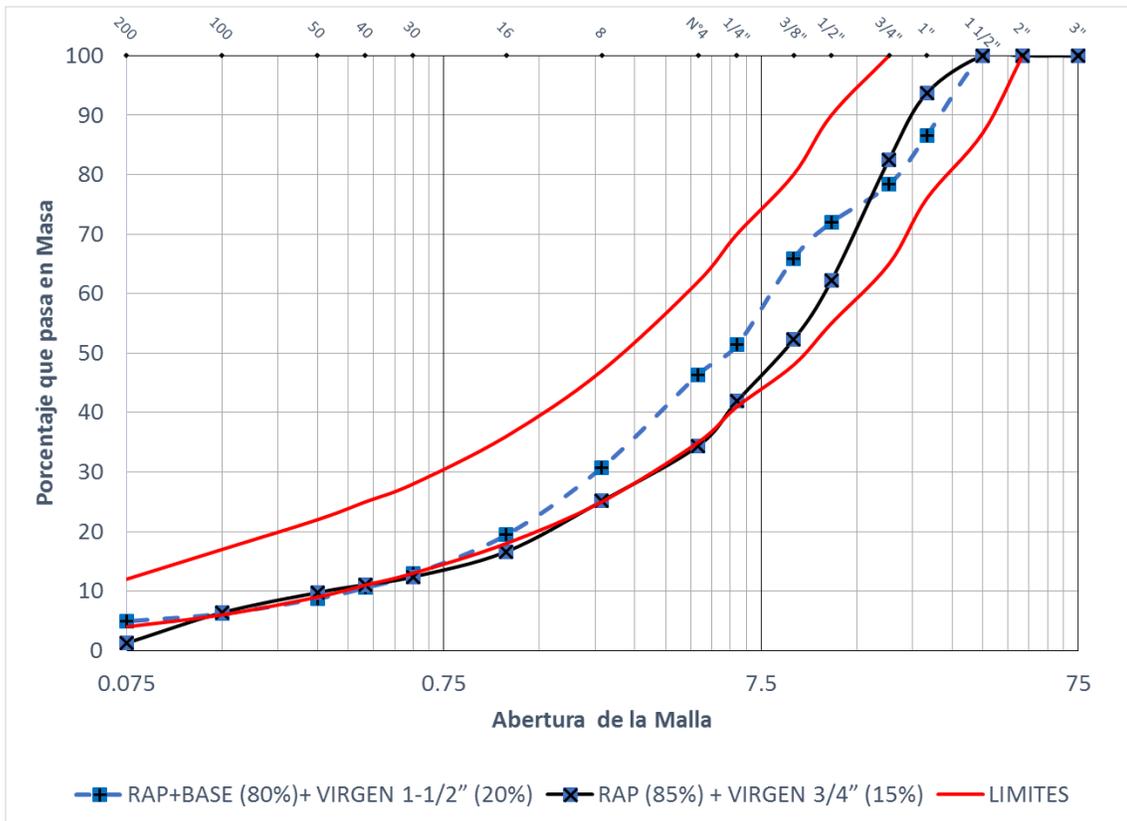
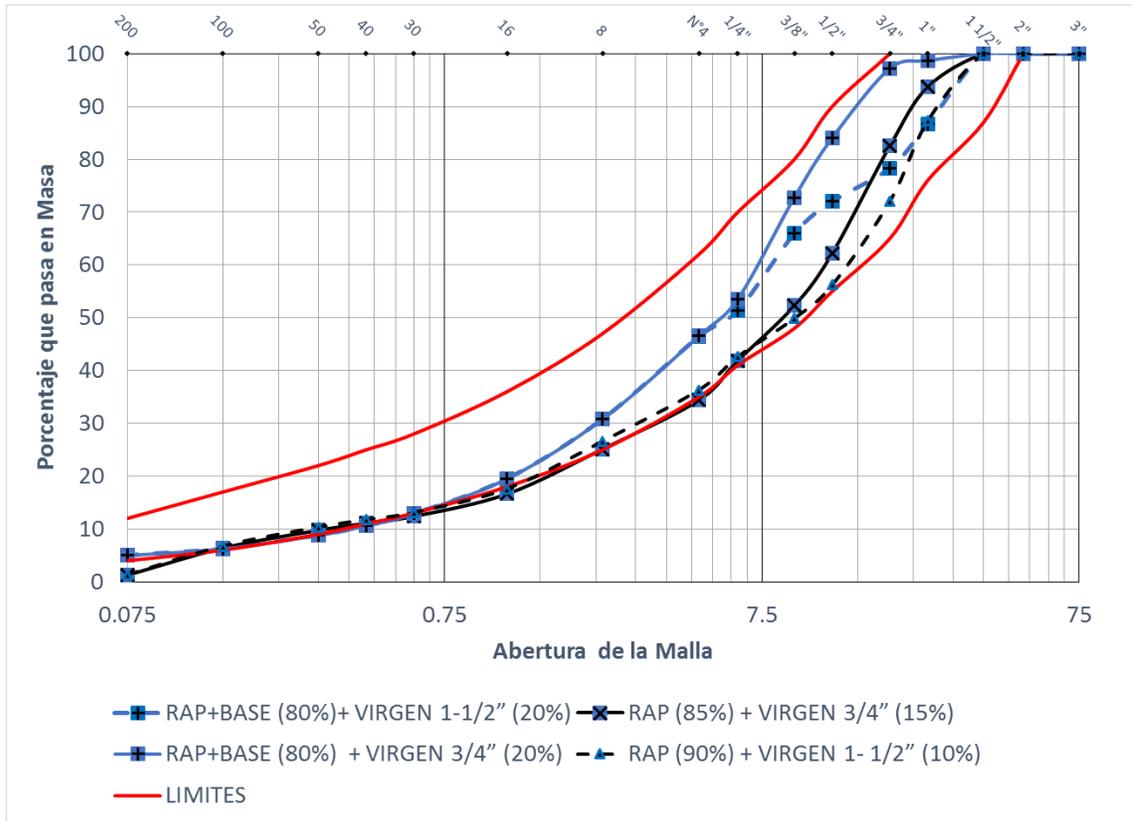
ÍNDICE PLÁSTICO 5.2 %

10.2 ANEXO B - POSIBLES COMBINACIONES DE LOS MATERIALES

	RAP+ BASE				RAP+ BASE			
	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
APERTURA DE MALLA EN MM	RAP+BASE (95%) + VIRGEN	RAP+BASE (90%) + VIRGEN	RAP+BASE (85%) + VIRGEN	RAP+BASE (80%) + VIRGEN	RAP+BASE (95%) + VIRGEN 1-	RAP+BASE (90%) + VIRGEN 1-	RAP+BASE (85%)+ VIRGEN 1-	RAP+BASE (80%)+ VIRGEN 1-
75	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100
37.5	100	100	100	100	100	100	100	100
25	98	99	99	99	95	92	90	87
19	97	97	97	97	92	87	83	78
12.5	88	87	85	84	85	81	76	72
9.5	80	78	75	73	78	74	70	66
6.3	62	59	56	54	61	58	55	51
4.75	55	52	49	47	55	52	49	46
2.36	37	35	33	31	37	35	33	31
1.18	23	22	21	19	23	22	21	19
0.6	15	14	14	13	15	14	14	13
0.425	13	12	11	11	13	12	11	11
0.3	10	10	9	9	10	10	9	9
0.15	7	7	7	6	7	7	7	6
0.075	6	6	5	5	6	6	5	5







10.3 ANEXO C - Cálculo para Peso de Bacheos Nivel I y II MEZCLA I CON 1% CAL

	γ_{dMAX} (kg/m3)	2080						
	W opt	8.0%						
	Wnat	1.0%						
	FILLER	1.0%	271.75 gr					
Vol; H=63.5mm	4"	V=	0.00049873 m3					
Vol; H=95mm	6"	V=	0.00167879 m3					
	Masa Seca 4"		1,037.35 gr					
	Masa Seca 6"		3,491.88 gr					
	4"							
SECOS	si		3,112.06 gr					
SATURADOS	si		3,112.06 gr					
	6"							
EQUIL	SI		10,475.64 gr					
SOAK	si		10,475.64 gr					
	TOTAL		27,175.40 gr					

MEZCLA I CON 1% CEMENTO

	γ MAX	2080	kg/m3					
	W opt	8.0%						
	Wnat	1.0%						
	FILLER	1.0%	271.75 gr					
Vol; H=63.5mm	4"	V=	0.00049873 m3					
Vol; H=95mm	6"	V=	0.00167879 m3					
	Masa Seca 4"		1,037.35 gr					
	Masa Seca 6"		3,491.88 gr					
	4"							
SECOS	SI		3,112.06 gr					
SATURADOS	SI		3,112.06 gr					
	6"							
EQUIL	SI		10,475.64 gr					
SOAK	SI		10,475.64 gr					
	TOTAL		27,175.40 gr					

MEZCLA I SIN FILLER ACTIVO

	γ MAX	2080	kg/m3					
	W opt	8.0%						
	Wnat	1.0%						
	FILLER	1.0%	300.00 gr					
Vol; H=63.5mm	4"	V=	0.00049873 m3					
Vol; H=95mm	6"	V=	0.00167879 m3					
	Masa Seca 4"		1,037.35 gr					
	Masa Seca 6"		3,491.88 gr					
	4"							
SECOS	SI		3,112.06 gr					
SATURADOS	SI		3,112.06 gr					
	6"							
EQUIL	SI		10,475.64 gr					
SOAK	SI		10,475.64 gr					
	TOTAL		30,000.00 gr		30300	29702.9703		

10.4 ANEXO D - Cálculo para Peso de Bacheos Nivel III

	γ MAX	2080	kg/m3	F.S.	5%			
	W opt	8%						
	Wnat	1%						
	FILLER	1%	123					
								$W_{agregar} = 0.75W_{ONC} - W_{secado\ al\ aire}$
								$M_{agua} = \left(\frac{W_{agregar}}{100}\right) \times (M_{muestra} + M_{cemento})$
Vol; H=150mm	6"	V=	0.00556365	m3	0.00556365			
								Wagregar 5.00%
	Masa Seca 6"	11572.3881	gr	12,272.5	F.S.			Magua 621.15 ml
	6"							
								$M_{asfalto} = \left(\frac{B_{agregado}}{100}\right) \times (M_{muestra} + M_{cemento})$
TRIAxIAL	SI	46,290	gr					Masfalto 2.3% 285.73 gr
REPLICA	SI	46,290	gr					
MR	SI	23,145	gr					2.4% 298.15 gr
	TOTAL	115,724	gr					2.5% 310.58 gr
	REALIZAR MAS BACHADAS							
	TOTAL	115723.9	gr					Magua plus 207.05 ml
		12300		NO	12300			
								No Capas 9
								Peso total Peso por Capa
								12,498.18 1,388.69

10.5 ANEXO E - Cálculo De Material Ponderado Para Bacheo

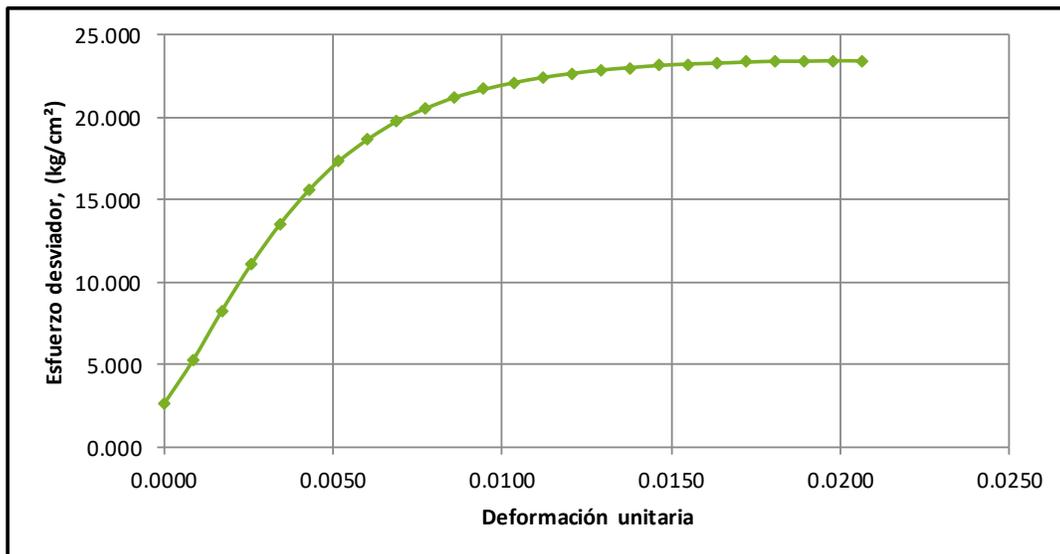
MATERIAL A PONDERAR					23	KG.	MATERIAL A PONDERAR					30	KG.
Porcentaje	80%				18,400.00	Gramos	Porcentaje	85%				25,500.00	Gramos
RAP+BASE						RAP							
ANALISIS DE MALLA		CANTIDAD DE MATERIAL A SER INCLUIDO				ANALISIS DE MALLA		CANTIDAD DE MATERIAL A SER INCLUIDO					
TAMAÑO DE MALLA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA	PASA 4.75 MM	PASA 13.2 MM Y RETIENE EN 4.75MM	PASA 19MM Y RETENIE EN 13.2		TAMAÑO DE MALLA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA	PASA 4.75 MM	PASA 13.2 MM Y RETIENE EN 4.75MM	PASA 19MM Y RETENIE EN 13.2			
19	97	10670.44	5857.78	1871.78		19	79	10287.26	5624.76	9587.99			
13.2	90										13.2	62	
4.75	58										4.75	40	
Porcentaje	20%				4,600.00	Gramos	Porcentaje	15%				4,500.00	Gramos
VIRGEN 1-1/2"						VIRGEN 1/2"							
ANALISIS DE MALLA		CANTIDAD DE MATERIAL A SER INCLUIDO				ANALISIS DE MALLA		CANTIDAD DE MATERIAL A SER INCLUIDO					
TAMAÑO DE MALLA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA	PASA 4.75 MM	PASA 13.2 MM Y RETIENE EN 4.75MM	PASA 19MM Y RETENIE EN 13.2		TAMAÑO DE MALLA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA	PASA 4.75 MM	PASA 13.2 MM Y RETIENE EN 4.75MM	PASA 19MM Y RETENIE EN 13.2			
19	6	0.00	24.21	4575.79		19	6	0.00	45.00	4455.00			
13.2	1										13.2	1	
4.75	0										4.75	0	

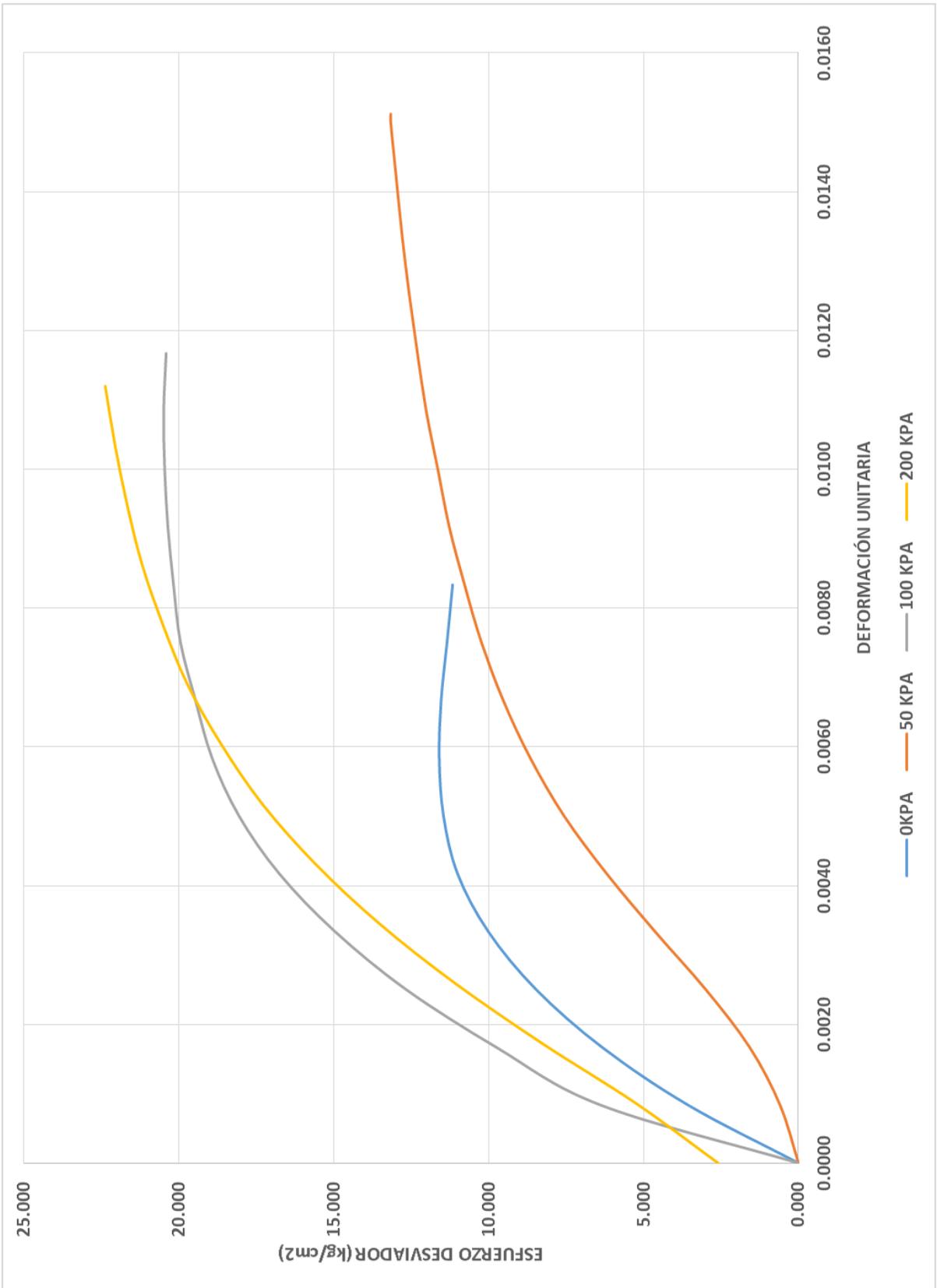
PRUEBA TRIAXIAL SIMPLE

OBRA	Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado	ENSAYE	005	D
		FECHA	30/09/2015	

MATERIALES PAR/	RAP +RECUPERADO 2.4% ASF. ESP. 1% CAL
TESISTA	ING. DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ

	LEC. DEF.	DEFORM.	LEC. CARGA	CARGA	DEFORM.	A. CORREGIDA	ESF. DESVIA.
	mm	cm	(10 ⁻³) mm	kg	UNITARIA	cm ²	kg/cm ²
Ds	15.04	cm					
Dn	15.07	cm					
Di	15.09	cm	0.00	462.448	0.0000	178.3167	2.593
Dp	15.07	cm	0.26	936.737	0.0009	178.4703	5.249
Ho	30.00	cm	0.52	1476.939	0.0017	178.6243	8.268
Ao	178.32	cm ²	0.77	1977.747	0.0026	178.7785	11.063
Vo	5349.50	cm ³	1.03	2418.380	0.0034	178.9330	13.516
W	11334.2	g	1.29	2790.968	0.0043	179.0877	15.584
yh	2.1187	g/cm ³	1.55	3100.301	0.0052	179.2427	17.297
ys	1.9807	g/cm ³	1.81	3341.613	0.0060	179.3980	18.627
σ _s	2.04	kg/cm	2.07	3540.351	0.0069	179.5536	19.718
Cte		kg/cm	2.33	3686.596	0.0077	179.7094	20.514
			2.58	3809.904	0.0086	179.8655	21.182
CÁPSULA	4		2.84	3900.430	0.0095	180.0219	21.666
MASA DE LA CÁPSULA			3.10	3974.780	0.0103	180.1785	22.060
			3.36	4036.011	0.0112	180.3354	22.381
MUESTRA HÚM + CÁP			3.62	4083.243	0.0121	180.4926	22.623
			3.87	4124.963	0.0129	180.6501	22.834
MUESTRA SECA + CÁP			4.13	4154.804	0.0138	180.8078	22.979
			4.39	4182.476	0.0146	180.9658	23.112
MASA DEL AGUA			4.65	4202.100	0.0155	181.1241	23.200
			4.91	4215.684	0.0164	181.2826	23.255
CONTENIDO DE AGUA			5.17	4230.428	0.0172	181.4415	23.316
6.97%	%		5.42	4243.719	0.0181	181.6006	23.368
			5.68	4247.827	0.0189	181.7600	23.371
			5.94	4256.773	0.0198	181.9197	23.399
			6.20	4257.998	0.0207	182.0811	23.385
						MÁXIMO	23.399



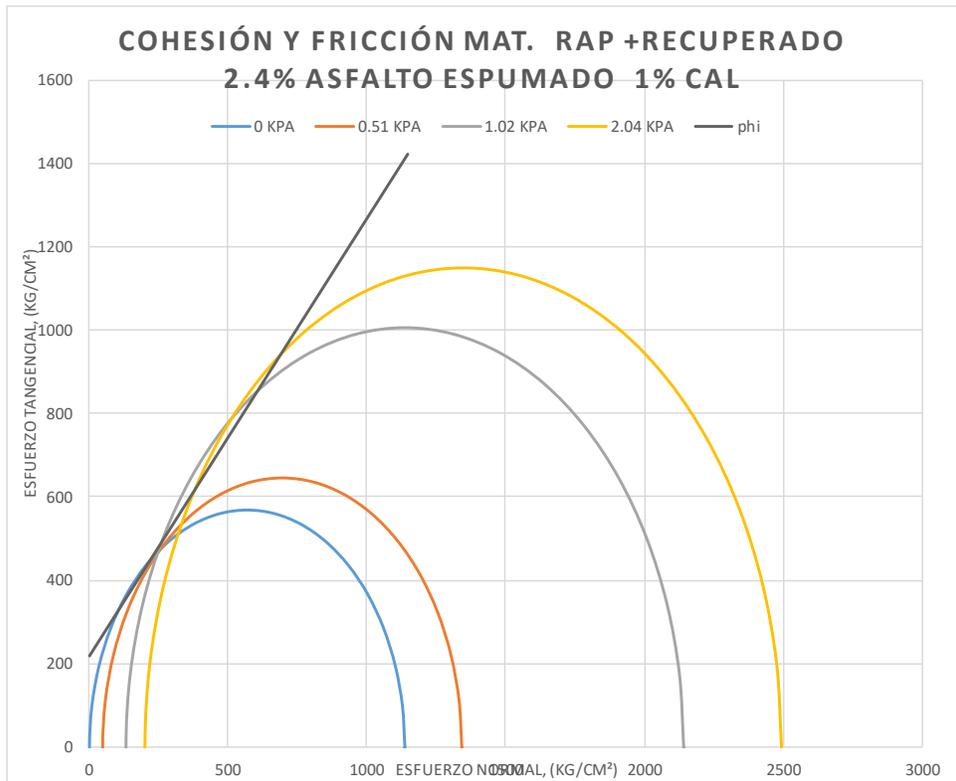


DETERMINACIÓN DE LA COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA

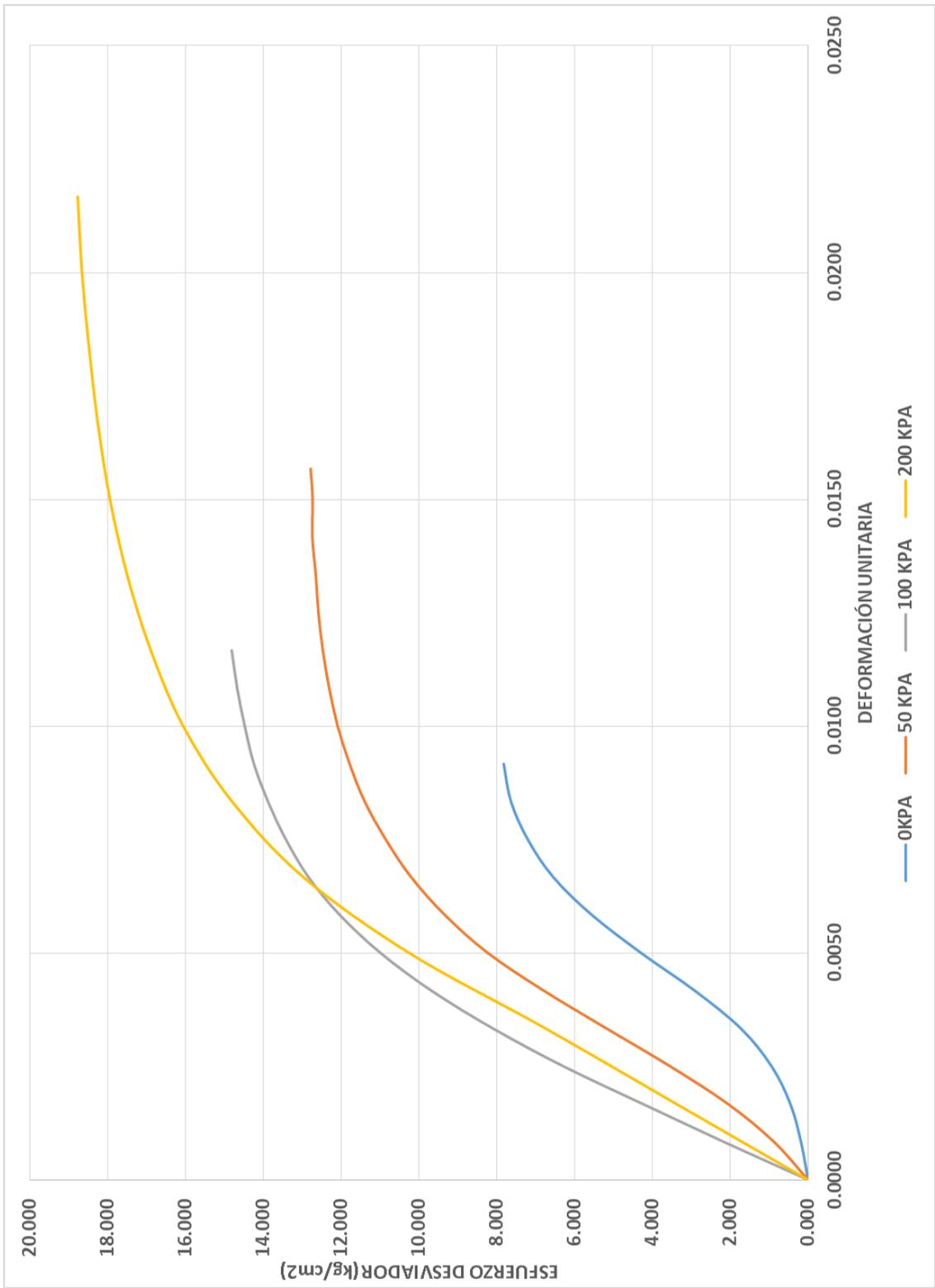
OBRA	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE MICROCARPETA DEL KM. 114+800 AL KM. 136+000 EN TRAMOS AISLADOS AMBOS CUERPOS DE LA AUTOPISTA CUERNAVACA-ACAPULCO (SEGUNDA ETAPA)	ENSAYE	005
		FECHA	30/09/2015

MATERIALES PARA	RAP +RECUPERADO 2.4% ASF. ESP. 1% CAL
TESISTA	ING. DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ

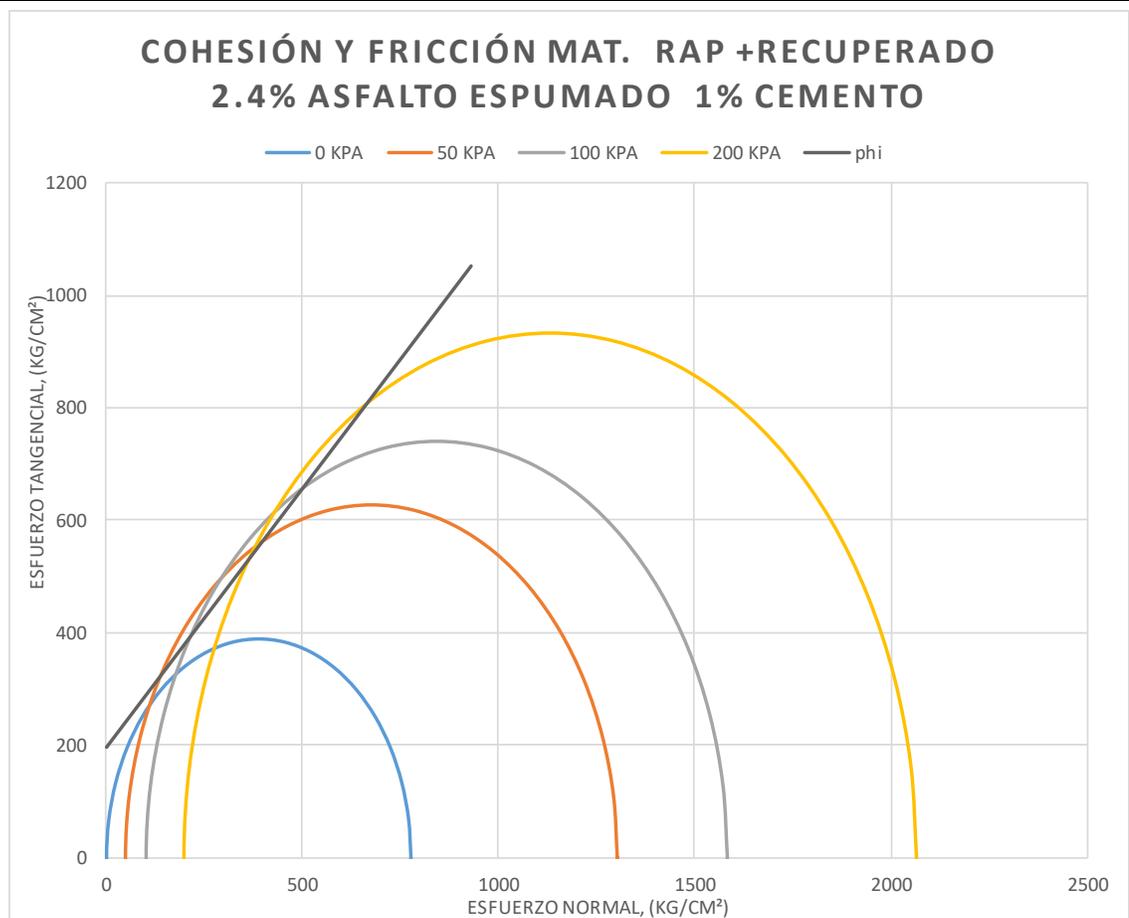
CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO				RESULTADOS				
ENSAYE	PRESIÓN LATERAL kg/cm ²	TENSIÓN DESVIADORA kg/cm ²	PRESIÓN ROTURA kg/cm ²	COHESIÓN, C kg/cm ²	TANGENTE ϕ	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ϕ	ESFUERZO NORMAL kg/cm ²	ESFUERZO TANGENCIAL kg/cm ²
A	0.00	1137.659	1137.659	218.68	1.05	46°20'18"		
B	50.00	1291.484	1291.484	218.68	1.05	46°20'18"		
C	100.00	2010.397	2010.397	218.68	1.05	46°20'18"		
D	200.00	2295.460	2295.460	218.68	1.05	46°20'18"		
E								
F								
G								
H								



COHESIÓN $\frac{244.70}{2.49}$ kPa / kg/cm² ÁNGULO DE FRICCIÓN $46^{\circ}20'$



DETERMINACIÓN DE LA COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA									
OBRA	Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado						ENSAYE	005	
							FECHA	01/03/2016	
MATERIALES PARA			RAP +RECUPERADO 2.4% ASF. ESP. 1% CEM - PROBETA CONTINUA						
TESISTA			ING. DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ						
CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO				RESULTADOS					
ENSAYE	PRESIÓN LATERAL kg/cm ²	TENSIÓN DESVIADORA kg/cm ²	PRESIÓN ROTURA kg/cm ²	COHESIÓN, C kg/cm ²	TANGENTE ϕ	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ϕ	ESFUERZO NORMAL kg/cm ²	ESFUERZO TANGENCIAL kg/cm ²	
A	0.00	777.245	777.245	195.90	0.92	42°			
B	50.00	1253.588	1253.588	195.90	0.92	42°			
C	100.00	1482.048	1482.048	195.90	0.92	42°			
D	200.00	1864.161	1864.161	195.90	0.92	42°			
E									
F									
G									
H									

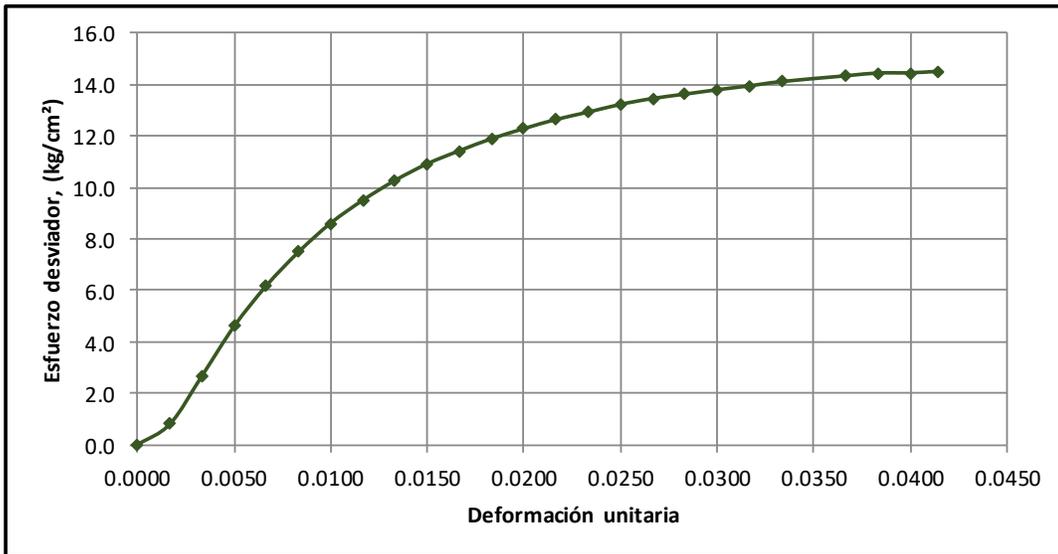


PRUEBA TRIAXIAL SIMPLE

OBRA	Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado	ENSAYE	005	C
		FECHA	01/03/2016	

MATERIALES PAR/	RAP +RECUPERADO 2.4% ASF. ESP. SIN FILLER - PROBETA CONTINUA
TESISTA	ING. DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ

	LEC. DEF.	DEFORM.	LEC. CARGA	CARGA	DEFORM.	A. CORREGIDA	ESF. DESVIA.
	mm	cm	(10 ⁻³) mm	kg	UNITARIA	cm ²	kg/cm ²
Ds	15.00	cm					
Dn	14.99	cm					
Di	14.98	cm	0.00	1.96	0.0000	176.48	0.011
Dp	14.99	cm	0.50	142.75	0.0017	176.77	0.808
Ho	30.00	cm	1.00	475.55	0.0033	177.07	2.686
Ao	176.48	cm ²	1.50	816.87	0.0050	177.37	4.606
Vo	5294.37	cm ³	2.00	1096.63	0.0067	177.66	6.173
W	11415.2	g	2.50	1330.63	0.0083	177.96	7.477
yh	2.1561	g/cm ³	3.00	1532.17	0.0100	178.26	8.595
ys	2.0183	g/cm ³	3.50	1693.48	0.0117	178.56	9.484
σ _s	1.02	kg/cm	4.00	1833.40	0.0133	178.86	10.250
Cte		kg/cm	4.50	1951.60	0.0150	179.17	10.893
			5.00	2045.77	0.0167	179.47	11.399
CÁPSULA	1		5.50	2132.79	0.0183	179.77	11.864
MASA DE LA CÁPSULA			6.00	2206.454	0.0200	180.08	12.253
			6.50	2274.513	0.0217	180.39	12.609
MUESTRA HÚM + CÁP			7.00	2329.877	0.0233	180.70	12.894
			7.50	2387.978	0.0250	181.00	13.193
MUESTRA SECA + CÁP			8.00	2433.580	0.0267	181.31	13.422
			8.50	2468.372	0.0283	181.63	13.590
MASA DEL AGUA			9.00	2503.427	0.0300	181.94	13.760
			9.50	2535.230	0.0317	182.25	13.911
CONTENIDO DE AGUA			10.00	2570.157	0.0333	182.56	14.078
6.83%	%		11.00	2619.876	0.0367	183.20	14.301
			11.50	2644.575	0.0383	183.51	14.411
			12.00	2650.717	0.0400	183.83	14.419
			12.43	2664.894	0.0414	184.11	14.475
						MÁXIMO	14.475

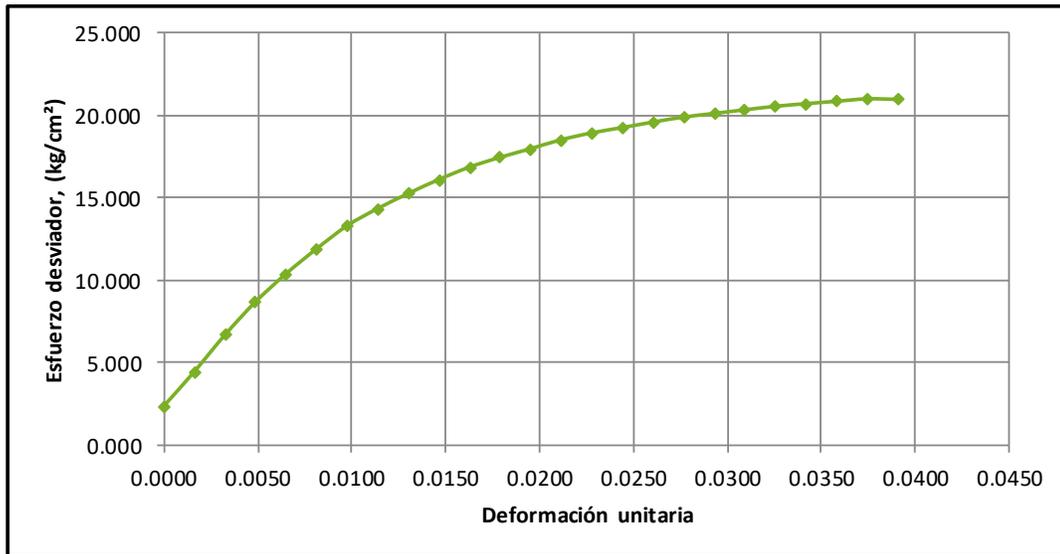


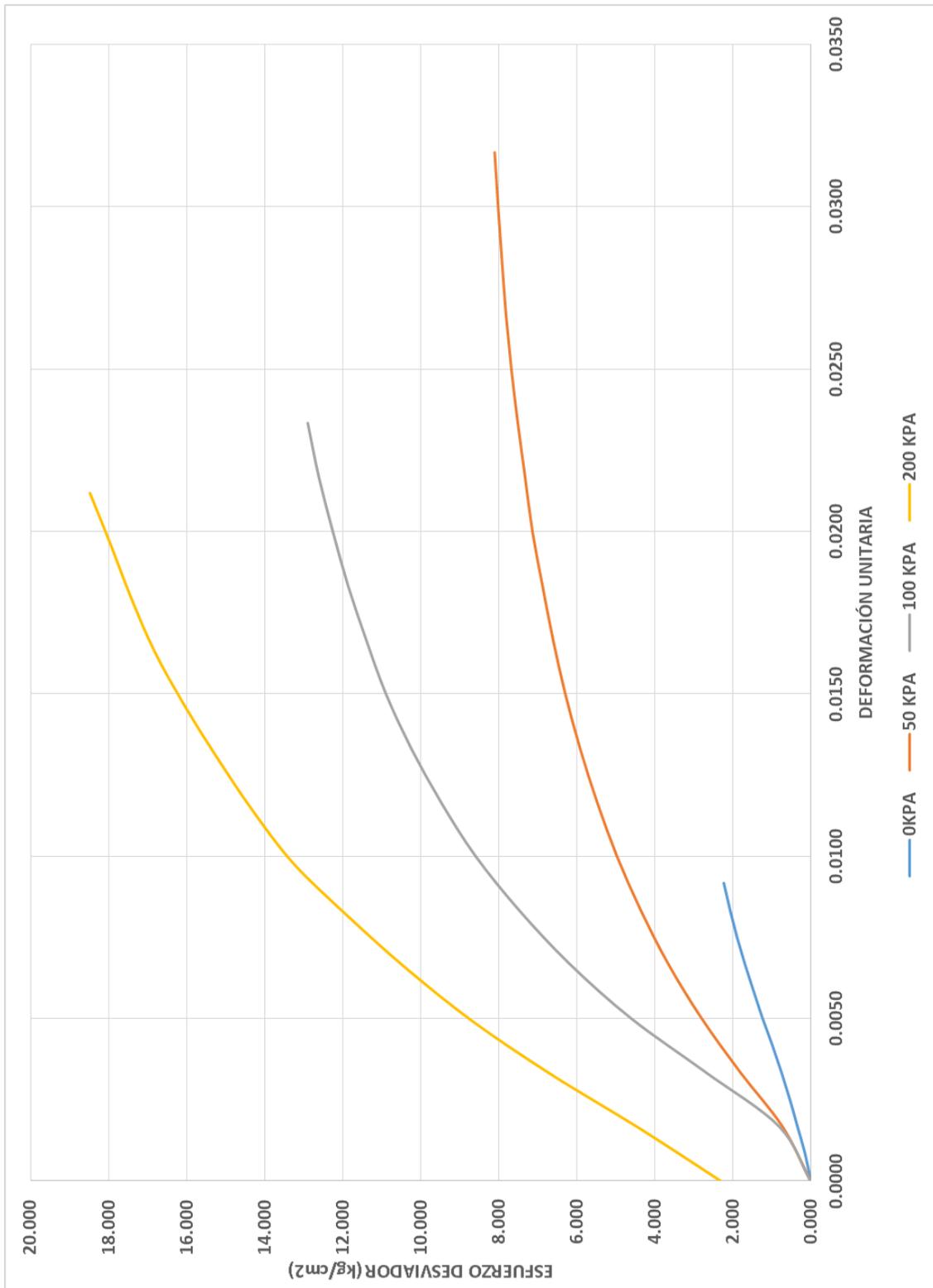
PRUEBA TRIAXIAL SIMPLE

OBRA	Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado	ENSAYE	005	D
		FECHA	01/03/2016	

MATERIALES PAR/	RAP +RECUPERADO 2.4% ASF. ESP. SIN FILLER - PROBETA CONTINUA
TESISTA	ING. DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ

	LEC. DEF.	DEFORM.	LEC. CARGA	CARGA	DEFORM.	A. CORREGIDA	ESF. DESVIA.
	mm	cm	(10 ⁻³) mm	kg	UNITARIA	cm ²	kg/cm ²
Ds	15.07	cm					
Dn	15.03	cm					
Di	15.00	cm	0.00	411.690	0.0000	177.5169	2.319
Dp	15.03	cm	0.49	784.177	0.0016	177.8066	4.410
Ho	30.00	cm	0.98	1181.396	0.0033	178.0972	6.633
Ao	177.52	cm ²	1.47	1541.329	0.0049	178.3887	8.640
Vo	5325.51	cm ³	1.95	1848.732	0.0065	178.6812	10.347
W	11319.8	g	2.44	2123.347	0.0081	178.9747	11.864
yh	2.1256	g/cm ³	2.93	2377.557	0.0098	179.2691	13.263
ys	1.9897	g/cm ³	3.42	2569.145	0.0114	179.5645	14.308
σ _s	2.04	kg/cm	3.91	2737.407	0.0130	179.8609	15.220
Cte		kg/cm	4.40	2894.448	0.0147	180.1582	16.066
			4.89	3034.708	0.0163	180.4566	16.817
CÁPSULA	1		5.38	3146.924	0.0179	180.7559	17.410
MASA DE LA CÁPSULA			5.86	3246.712	0.0195	181.0562	17.932
		g	6.35	3350.938	0.0212	181.3575	18.477
MUESTRA HÚM + CÁP			6.84	3432.009	0.0228	181.6599	18.893
		g	7.33	3496.450	0.0244	181.9632	19.215
MUESTRA SECA + CÁP			7.82	3562.650	0.0261	182.2675	19.546
		g	8.31	3624.326	0.0277	182.5729	19.851
MASA DEL AGUA			8.80	3670.178	0.0293	182.8793	20.069
		g	9.29	3717.092	0.0310	183.1867	20.291
CONTENIDO DE AGUA			9.77	3761.862	0.0326	183.4952	20.501
6.83%	%		10.26	3797.885	0.0342	183.8047	20.663
			10.75	3831.115	0.0358	184.1152	20.808
			11.24	3864.612	0.0375	184.4268	20.955
			11.73	3865.571	0.0391	184.7395	20.924
						MÁXIMO	20.955



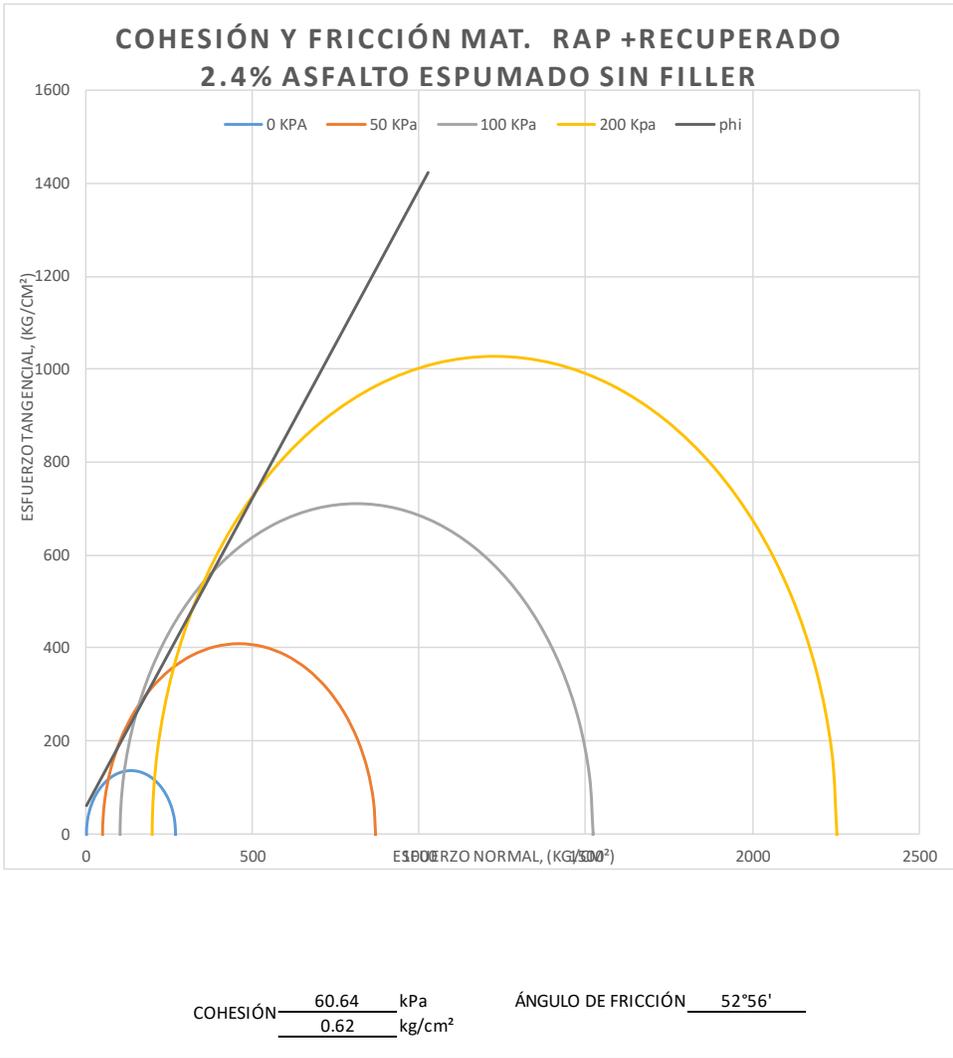


DETERMINACIÓN DE LA COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA

OBRA	Diseño Y Evaluación Del Desempeño Mecánico De Una Base Hidráulica Reciclada Mediante La Tecnología De Asfalto Espumado	ENSAYE	005
		FECHA	01/03/2016

MATERIALES PARA RAP +RECUPERADO 2.4% ASF. ESP. SIN FILLER - PROBETA CONTINUA
 TESISISTA ING. DOMINGO EDUARDO CAMPOS HERNÁNDEZ

CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO				RESULTADOS				
ENSAYE	PRESIÓN LATERAL kg/cm ²	TENSIÓN DESVIADORA kg/cm ²	PRESIÓN ROTURA kg/cm ²	COHESIÓN, C kg/cm ²	TANGENTE ϕ	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ϕ	ESFUERZO NORMAL kg/cm ²	ESFUERZO TANGENCIAL kg/cm ²
A	0.00	268.938	268.938	60.64	1.32	52°56'39"		
B	50.00	819.146	819.146	60.64	1.32	52°56'39"		
C	100.00	1419.964	1419.964	60.64	1.32	52°56'39"		
D	200.00	2055.658	2055.658	60.64	1.32	52°56'39"		
E								
F								
G								
H								



10.10 ANEXO J- Resultado de la Prueba de Módulo de Resiliencia.



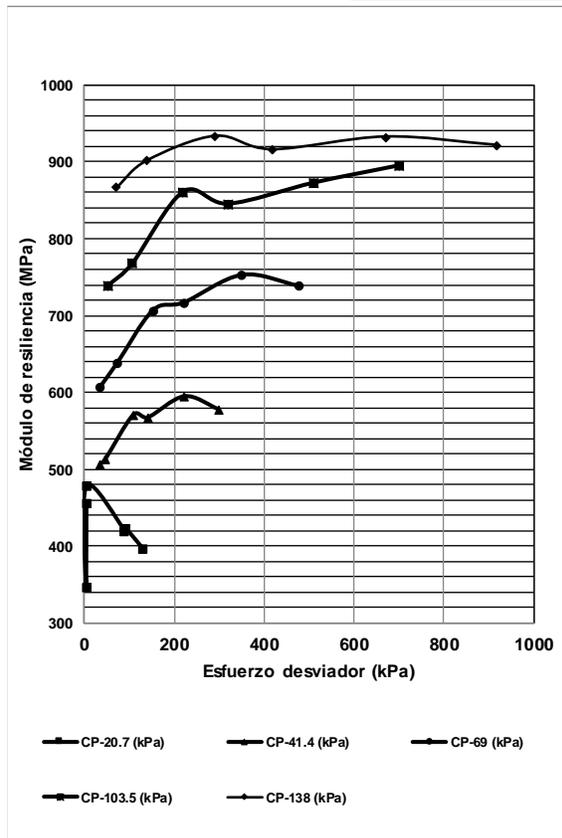
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
DIVISIÓN DE LABORATORIOS

MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES

Km 12+000 carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila, mpio de Pedro Escobedo, Querétaro 76700

Material:	RAP + Base (80%) + Vilgen 1 (20%)
Descripción de la muestra:	Asfalto Espumado
Cantidad de Asfalto Espumado:	2.40%
Filler Activo:	1% Cal
Prueba a realizar:	Módulo de Resiliencia

DATOS DE MUESTRAS COMPACTADAS					
Muestra No.:	MCM-5	Diámetro (mm):	150.40	w (%):	4.20
No. de capas:	9	Altura (mm):	300	γ_m (kg/m ³):	2170
No. de golpes por capa:	56	Masa muestra (g):	11,566	γ_d (kg/m ³):	2083
		Area (cm ²):	177.66	γ_d MAX (kg/m ³):	2080
		Volumen (cm ³):	5329.76	Comp. Rel	100.1%



σ_3 (kPa)	σ_1 (kPa)	θ (kPa)	M_r (MPa)
20.7	4.5953	66.695	456
20.7	3.9971	66.097	347
20.7	4.5648	66.665	478
20.7	89.142	151.24	420
20.7	90.945	153.04	423
20.7	128.27	190.37	397
41.4	34.161	158.36	506
41.4	45.819	170.02	512
41.4	108.33	232.53	571
41.4	140.67	264.87	567
41.4	221.78	345.98	595
41.4	298.55	422.75	577
69	34.901	241.9	606
69	73.699	280.7	638
69	152.31	359.31	706
69	221.49	428.49	717
69	349.62	556.62	753
69	476.29	683.29	738
103.5	51.308	361.81	740
103.5	105.15	415.65	768
103.5	218.9	529.4	861
103.5	319.92	630.42	845
103.5	510.42	820.92	872
103.5	700	1010.5	895
138	70.287	484.29	867
138	138.41	552.41	902
138	289.79	703.79	934
138	416.64	830.64	916
138	670.12	1084.1	933
138	918.03	1332	922

OBSERVACIONES:	
AASHTO MODIFICADA EN 9 CAPAS 56 GOLPES, SECADO POR 48 HRS HASTA EL 50% DE SU HUMEDAD ÓPTIMA	
Realizó:	Ing. Domingo Eduardo Campos H. Tesisista del área de Asfaltos
Calculó:	Ing. Domingo Eduardo Campos H.
Revisó:	Dr. Horacio Delgado Alamilla

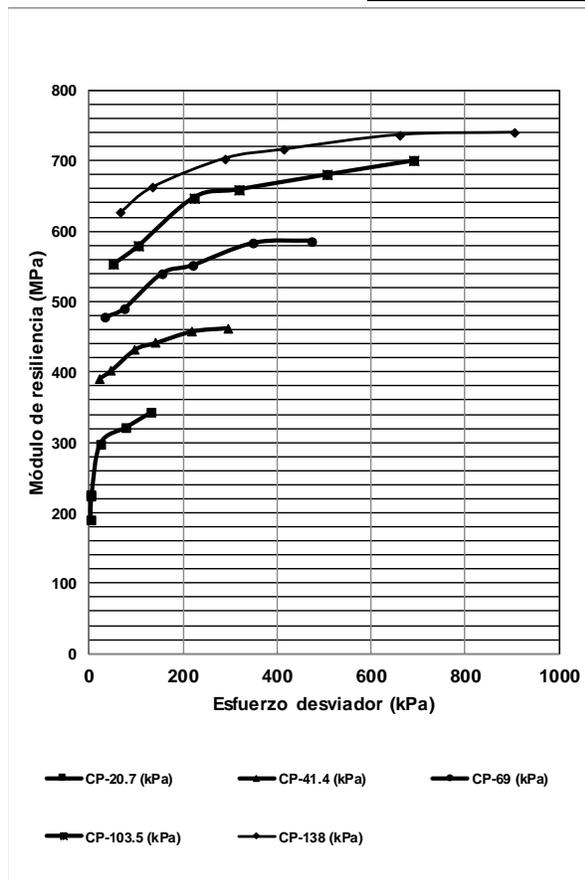


INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
DIVISIÓN DE LABORATORIOS
MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES

Km 12+000 carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila, mpio de Pedro Escobedo, Querétaro 76700

Material:	RAP + Base (80%) + Virgen 1 (20%)
Descripción de la muestra:	Asfalto Espumado
Cantidad de Asfalto Espumado:	2.40%
Filler Activo:	1% Cemento
Prueba a realizar:	Módulo de Resiliencia

DATOS DE MUESTRAS COMPACTADAS					
Muestra No.:	MCM-10	Diámetro (mm):	150.01	w (%):	3.52
No. de capas:	9	Altura (mm):	300	γ_m (kg/m ³):	2175
No. de golpes por capa:	56	Masa muestra (g):	11,534	γ_d (kg/m ³):	2101
		Area (cm ²):	176.74	γ_d MAX (kg/m ³):	2080
		Volumen (cm ³):	5302.16	Comp. Rel	101.0%



σ_3 (kPa)	σ_1 (kPa)	θ (kPa)	M_r (MPa)
20.7	3.6787	65.779	227
20.7	3.9104	66.01	190
20.7	5.6826	67.783	224
20.7	24.496	86.596	298
20.7	80.039	142.14	321
20.7	132.89	194.99	343
41.4	22.137	146.34	391
41.4	47.032	171.23	402
41.4	98.062	222.26	432
41.4	142.31	266.51	442
41.4	219.69	343.89	458
41.4	295.29	419.49	463
69	35.808	242.81	478
69	76.2	283.2	491
69	155.62	362.62	540
69	220.93	427.93	552
69	349.56	556.56	583
69	473.51	680.51	586
103.5	52.451	362.95	553
103.5	105.11	415.61	579
103.5	223.64	534.14	647
103.5	319.45	629.95	659
103.5	507.1	817.6	680
103.5	691.87	1002.4	699
138	68.351	482.35	627
138	135.25	549.25	662
138	289.13	703.13	703
138	414.16	828.16	716
138	660.86	1074.9	736
138	904.18	1318.2	740

OBSERVACIONES:	
AASHTO MODIFICADA EN 9 CAPAS 56 GOLPES, SECADO POR 48 HRS HASTA EL 50% DE SU HUMEDAD ÓPTIMA	
Realizó:	Ing. Domingo Eduardo Campos H.
Tesista del área de Asfaltos	
Calculó:	Ing. Domingo Eduardo Campos H.
Revisó:	Dr. Horacio Delgado Alamilla

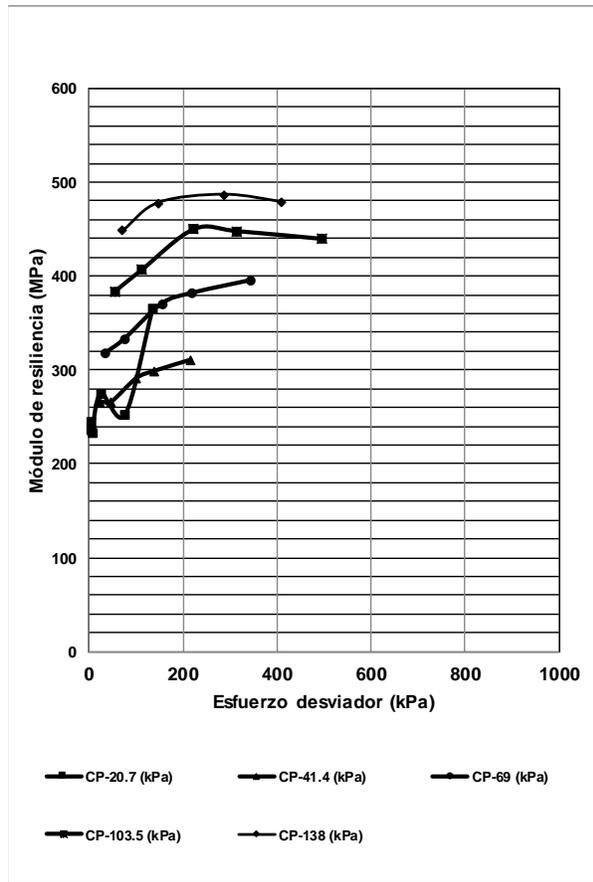


INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
DIVISIÓN DE LABORATORIOS
MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES

Km 12+000 carretera Querétaro-Galindo, Sanfandilia, mpio de Pedro Escobedo, Querétaro 76700

Material:	RAP + Base (80%) + Virgen 1 (20%)
Descripción de la muestra:	Asfalto Espumado
Cantidad de Asfalto Espumado:	2.40%
Filler Activo:	SIN FILLER
Prueba a realizar:	Módulo de Resiliencia

DATOS DE MUESTRAS COMPACTADAS					
Muestra No.:	MCM-16	Diámetro (mm):	150.79	w (%):	3.41
No. de capas:	9	Altura (mm):	300	γ_m (kg/m ³):	2141
No. de golpes por capa:	56	Masa muestra (g):	11,470	γ_d (kg/m ³):	2070
		Area (cm ²):	178.58	γ_d MAX (kg/m ³):	2080
		Volumen (cm ³):	5357.44	Comp. Rel	99.5%



σ_3 (kPa)	σ_1 (kPa)	θ (kPa)	M_r (MPa)
20.7	3.1719	65.272	236
20.7	3.7669	65.867	246
20.7	6.0868	68.187	234
20.7	25.148	87.248	275
20.7	76.014	138.11	252
20.7	134.58	196.68	367
41.4	21.492	145.69	266
41.4	46.365	170.56	266
41.4	98.881	223.08	291
41.4	139.49	263.69	299
41.4	214.84	339.04	311
41.4	287.6	411.8	
69	35.538	242.54	318
69	76.392	283.39	333
69	155.25	362.25	371
69	219.73	426.73	383
69	344.11	551.11	396
69	464.41	671.41	
103.5	53.833	364.33	384
103.5	112.68	423.18	408
103.5	222.22	532.72	451
103.5	314.85	625.35	448
103.5	494.86	805.36	440
103.5	671.09	981.59	
138	71.072	485.07	449
138	146.99	560.99	478
138	285.74	699.74	487
138	407.75	821.75	479
138	642.41	1056.4	
138	869.59	1283.6	

OBSERVACIONES:	
AASHTO MODIFICADA EN 9 CAPAS 56 GOLPES, SECADO POR 48 HRS HASTA EL 50% DE SU HUMEDAD ÓPTIMA	
Realizó:	Ing. Domingo Eduardo Campos H. Tesisista del área de Asfaltos
Calculó:	Ing. Domingo Eduardo Campos H.
Revisó:	Dr. Horacio Delgado Alamilla

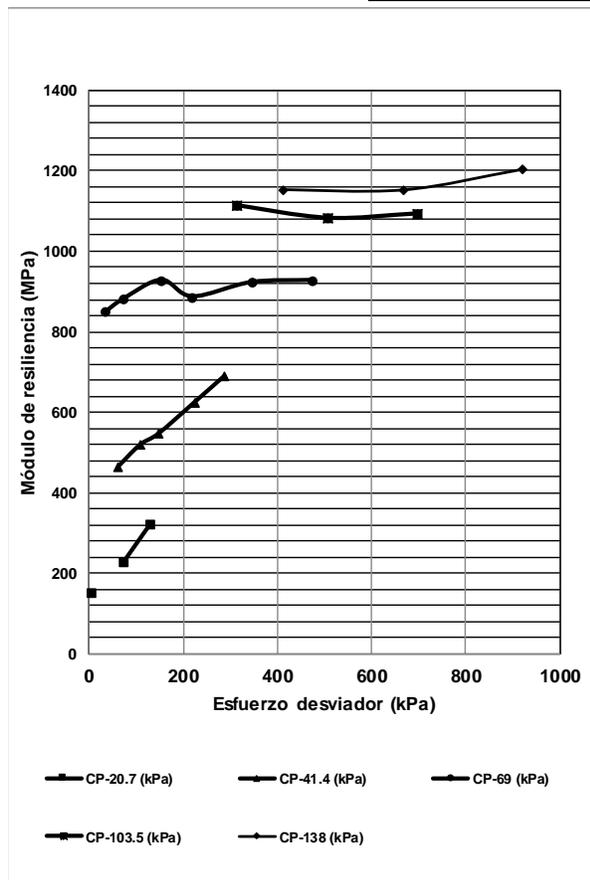


INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
DIVISIÓN DE LABORATORIOS
MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES

Km 12+000 carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila, mpio de Pedro Escobedo, Querétaro 76700

Material:	RAP + Base (80%) + Virgen 1 (20%)
Descripción de la muestra:	Asfalto Espumado
Cantidad de Asfalto Espumado:	2.30%
Filler Activo:	1% Cal
Prueba a realizar:	Módulo de Resiliencia

DATOS DE MUESTRAS COMPACTADAS					
Muestra No.:	MCA-3	Diámetro (mm):	150.68	w (%):	3.89
No. de capas:	9	Altura (mm):	300	γ_m (kg/m ³):	2182
No. de golpes por capa:	56	Masa muestra (g):	11,673	γ_d (kg/m ³):	2100
		Area (cm ²):	178.31	γ_d MAX (kg/m ³):	2080
		Volumen (cm ³):	5349.27	Comp. Rel	101.0%



σ_3 (kPa)	α_3 (kPa)	θ (kPa)	M_r (MPa)
20.7	5.126	67.226	151
20.7	5.4687	67.569	
20.7	7.9345	70.035	
20.7	16.689	78.789	
20.7	73.085	135.18	227
20.7	128.1	190.2	321
41.4	24.118	148.32	
41.4	62.311	186.51	466
41.4	108.65	232.85	520
41.4	148.3	272.5	548
41.4	224.25	348.45	625
41.4	288.28	412.48	691
69	35.134	242.13	849
69	73.863	280.86	881
69	153.71	360.71	928
69	220.06	427.06	887
69	345.55	552.55	922
69	475.8	682.8	927
103.5	51.661	362.16	
103.5	105.94	416.44	
103.5	220.33	530.83	
103.5	315.2	625.7	1115
103.5	508.47	818.97	1083
103.5	698.8	1009.3	1094
138	69.515	483.52	
138	142.46	556.46	
138	288.51	702.51	
138	413.1	827.1	1154
138	668.85	1082.8	1153
138	920.02	1334	1205

OBSERVACIONES:	
AASHTO MODIFICADA EN 9 CAPAS 56 GOLPES, SECADO POR 48 HRS HASTA EL 50% DE SU HUMEDAD ÓPTIMA	
Realizó:	Ing. Domingo Eduardo Campos H. Tesisista del área de Asfaltos
Calculó:	Ing. Domingo Eduardo Campos H.
Revisó:	Dr. Horacio Delgado Alamilla

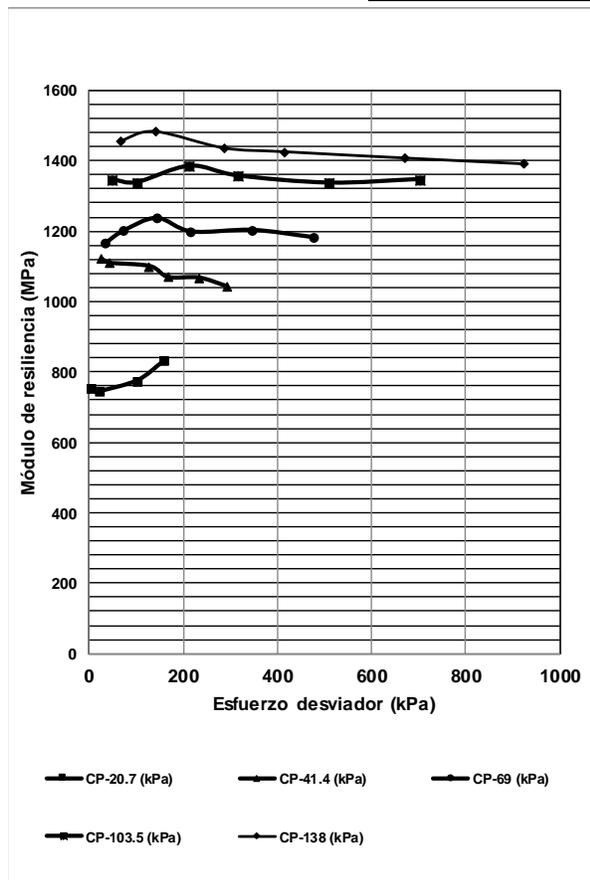


INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA
DIVISIÓN DE LABORATORIOS
MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES GRANULARES

Km 12+000 carretera Querétaro-Galindo, Sanfandila, mpio de Pedro Escobedo, Querétaro 76700

Material:	RAP + Base (80%) + Virgen 1 (20%)
Descripción de la muestra:	Asfalto Espumado
Cantidad de Asfalto Espumado:	2.50%
Filler Activo:	1% Cal
Prueba a realizar:	Módulo de Resiliencia

DATOS DE MUESTRAS COMPACTADAS					
Muestra No.:	MCA-4	Diámetro (mm):	150.54	w (%):	3.87
No. de capas:	9	Altura (mm):	300	γ_m (kg/m ³):	2161
No. de golpes por capa:	56	Masa muestra (g):	11,538	γ_d (kg/m ³):	2080
		Area (cm ²):	177.99	γ_d MAX (kg/m ³):	2080
		Volumen (cm ³):	5339.69	Comp. Rel	100.0%



σ_3 (kPa)	α_3 (kPa)	θ (kPa)	M_r (MPa)
20.7	5.7799	67.88	755
20.7	6.1915		
20.7	7.923		
20.7	22.296	84.396	744
20.7	102.66	164.76	775
20.7	159.45	221.55	831
41.4	25.409	149.61	1122
41.4	42.391	166.59	1110
41.4	127.93	252.13	1101
41.4	166.84	291.04	1070
41.4	232.19	356.39	1069
41.4	291.83	416.03	1044
69	34.466	241.47	1165
69	72.962	279.96	1202
69	143.13	350.13	1240
69	216.74	423.74	1199
69	345.89	552.89	1204
69	476.76	683.76	1182
103.5	49.694	360.19	1346
103.5	101.9	412.4	1338
103.5	213.39	523.89	1385
103.5	315.55	626.05	1357
103.5	509.96	820.46	1337
103.5	702.98	1013.5	1347
138	66.524	480.52	1456
138	139.96	553.96	1482
138	286.56	700.56	1437
138	415.76	829.76	1426
138	671.47	1085.5	1409
138	924.51	1338.5	1393

OBSERVACIONES:	
AASHTO MODIFICADA EN 9 CAPAS 56 GOLPES, SECADO POR 48 HRS HASTA EL 50% DE SU HUMEDAD ÓPTIMA	
Realizó:	Ing. Domingo Eduardo Campos H.
Tesista del área de Asfaltos	
Calculó:	Ing. Domingo Eduardo Campos H.
Revisó:	Dr. Horacio Delgado Alamilla

10.11 ANEXO K- Manual Práctico para el Diseño de Asfalto Espumado

A. CONTENIDO

Este manual define el procedimiento de diseño para la implementación de Materiales Estabilizados con Asfalto (MEA), esto mediante la metodología de asfalto espumado para su utilización en el diseño estructural de los pavimentos.

B. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Este procedimiento permite determinar la cantidad necesaria de asfalto espumado requerida por el material granular, así como la clasificación, análisis, mejora, y diseño de la mezcla para el óptimo comportamiento de la misma.

C. REFERENCIAS

AASHTO. (1993). American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO Guide*. Washington, D.C.

Asphalt Academy. (2009). *Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials* (Segunda ed.). Pretoria, South Africa: Asphalt Academy. doi:ISBN 978-0-7988-5582-2

ASTM C136 / C136M - 14. (2014). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. American Society for Testing Materials. doi:10.1520/C0136_C0136M-14

ASTM C702 / C702M - 11. (2011). *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. American Society for Testing Materials. doi:10.1520/C0702_C0702M-11

ASTM D6373-13. (2013). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. American Society for Testing Materials. doi:10.1520/D6373

M-MMP-1-07/07. (2007). *Límites de Consistencia*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Obtenido de <http://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-07-07.pdf>

N-CMT-4-02-002/04. (15 de 11 de 2004). *Materiales para Bases Hidráulicas*. México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

N-CMT-4-02-003/04. (15 de 11 de 2014). *Materiales para Bases Tratadas*. México: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

Wirtgen. (2004). *Wirtgen Cold Recycling Manual*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.

Wirtgen. (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.

D. EQUIPO Y MATERIALES

Los equipos para la ejecución de las pruebas estarán en condición de operación, calibrados, limpios y completos en todas sus partes.

E. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

La ejecución completa para la elaboración de especímenes para el diseño de asfalto espumado, se encuentra descrito a continuación mediante diferentes normativas, y procedimientos sustentados mediante teoría y experimentación

F. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

1. CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO Y RAP

1.1 REDUCCIÓN DE LA MUESTRA

Mediante la Norma ASTM C 702-98(03) se reduce las muestras de los agregados.



1.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

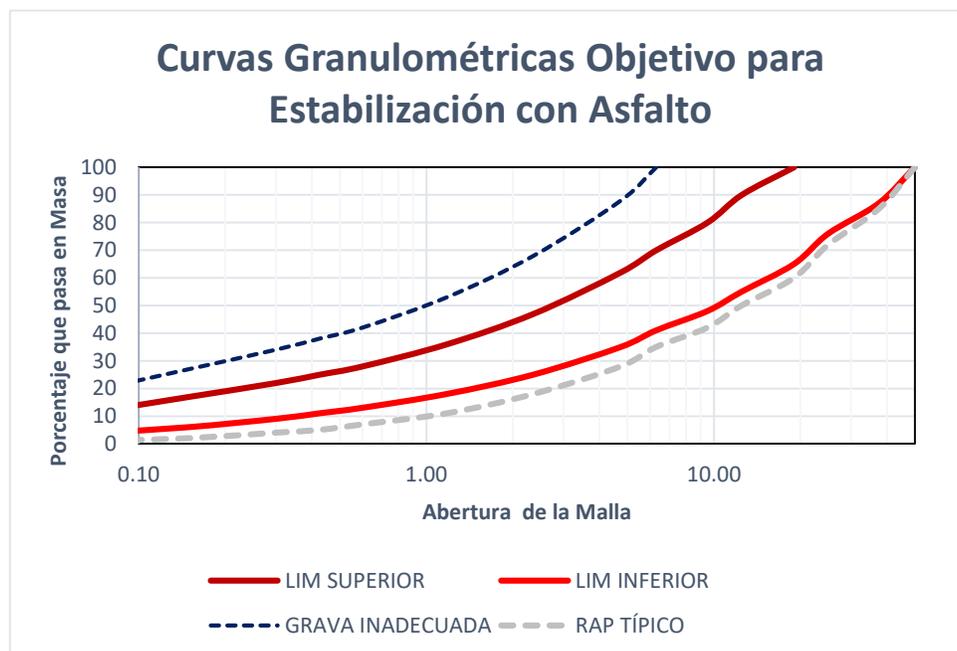
Se realiza este ensayo partiendo de la norma (M-MP-4-04-002/02), pero en esta ocasión existe una variante en las aperturas, en las cuales se utilizan las siguientes mallas:

Designación	Apertura (mm)
2"	50.00
1 1/2"	37.50
1"	25.00
3/4"	19.00
1/2"	12.50
3/8"	9.50
1/4"	6.30
N°4	4.75

Designación	Apertura (mm)
8	2.360
16	1.180
30	0.600
40	0.425
50	0.300
100	0.150
200	0.075



Dicha prueba pretende evaluar el material y la posibilidad de ser mejorado con material virgen para integrar la curva en los límites según la siguiente gráfica.



A continuación se muestran los límites de cada apertura de las diferentes mallas según la gráfica anteriormente mostrada.

APERTURA DE MALLA		LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR	GRAVA INADECUADA	RAP TÍPICO
IN.	mm				
2"	50.00	100	100	100	100
1 1/2"	37.50	100	87	100	85
1"	25.00	100	76	100	72
3/4"	19.00	100	65	100	60
1/2"	12.50	90	55	100	50
3/8"	9.50	80	48	100	42
1/4"	6.30	70	41	100	35
N°4	4.75	62	35	88	28
8	2.360	47	25	68	18
16	1.180	36	18	53	11
30	0.600	28	13	42	7
40	0.425	25	11	38	5
50	0.300	22	9	34	4
100	0.150	17	6	27	2
200	0.075	12	4	20	1

1.3 LÍMITES DE ATTERBERG

Para determinar el índice de plasticidad del material RAP se procede en base a la norma (M-MMP-1-07/07)



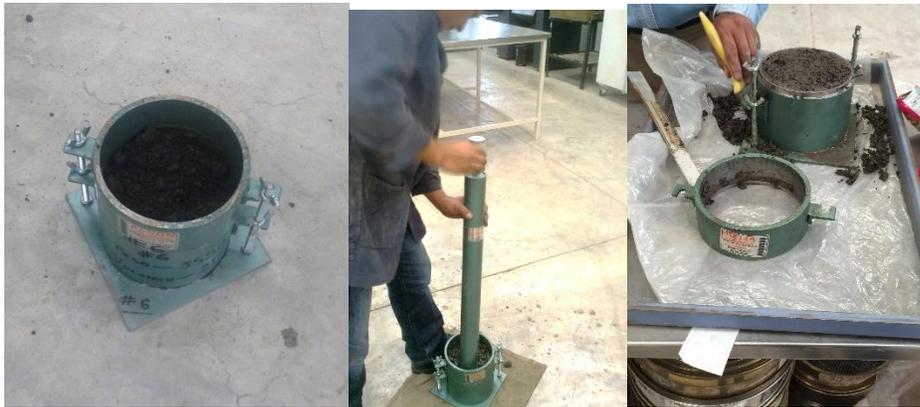
1.4 CONTENIDO DE AGUA

Para determinar el contenido de agua natural del material RAP se procede en base (M-MP-1-04/03)



1.5 COMPACTACIÓN

Dicha prueba tiene como objetivo encontrar el contenido de humedad óptima para la mezcla, y la densidad seca máxima, esto mediante la norma (M-MMP-1-09/06)



Las propiedades de los materiales necesarios para el éxito del tratamiento con asfalto espumado incluyen características de durabilidad del material natural (sin tratamiento), así como la plasticidad, granulometría, entre otras. Las pruebas principales que se utilizan para indicar la clase de **MEA** (Material Estabilizado con Asfalto) que se puede lograr a través de ésta metodología se muestran en la siguiente tabla.

PRUEBAS DE MATERIAL E INDICADORES PARA LA CLASIFICACIÓN DE MEA				
PRUEBA	DISEÑO EQUIVALENTE			NO RECOMENDABLE A TRATAMIENTO
	MEA 1	MEA 2	MEA 3	
CBR SATURADO (%)	>80	25-80	10-25	<10
< 0.075 MM (%)	4-15	4-20	4-30	<30
DENSIDAD RELATIVA	> 0.98	0.95 - 0.98	0.93 - 0.95	<0.93
ÍNDICE PLÁSTICO	<6	<10	<15	>15

2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ESPUMANTES DEL ASFALTO.

Las propiedades espumantes de cada tipo de asfalto se caracterizan por:

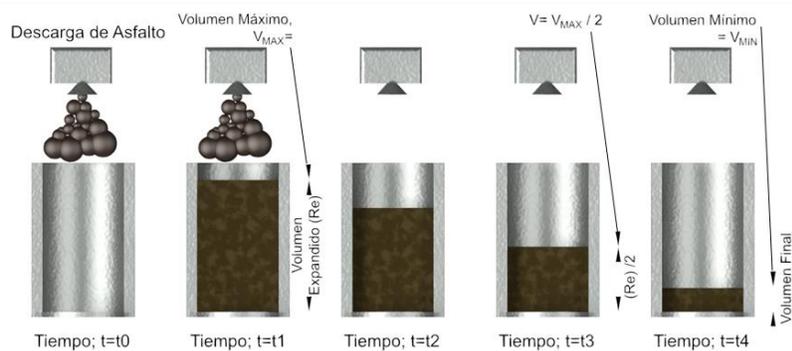
2.1 RELACIÓN DE EXPANSIÓN.

Una medida de la viscosidad del asfalto espumado, calculado como la proporción máxima del volumen de la espuma respecto del volumen original del asfalto.

2.2 VIDA MEDIA.

Una medida de la estabilidad del asfalto espumado, calculado como el tiempo tomado en segundos por la espuma en colapsar a la mitad de su volumen máximo.

En la figura que se muestra a continuación se puede apreciar el colapso del asfalto espumado al paso del tiempo después de realizar la descarga.



El objetivo de este ensayo es determinar la temperatura así como el porcentaje de agua a añadir que se requiere para producir las mejores propiedades de la espuma (relación de expansión máxima y vida media) para un tipo de asfalto. Esto se logra a tres diferentes temperaturas del asfalto (sin exceder los 195°) con el siguiente procedimiento:

Paso 1. Calentar el asfalto en la caldera de la unidad de laboratorio Wirtgen WLB10S circulando el asfalto con la bomba a través del sistema hasta que se alcance la temperatura requerida (normalmente iniciando con 160°C). Mantener la temperatura por al menos 5 minutos antes de comenzar con la prueba.



Paso 2. Ajustar la velocidad de descarga del asfalto y ajustar el temporizador en el Wirtgen WLB10 S para descargar 500g de asfalto ($Q_{asfalto}$)



Paso 3. Ajustar el medidor de flujo de agua para alcanzar la cantidad requerida de agua (normalmente comenzando con el 2% de la masa de asfalto).



Paso 4. Descargue el asfalto espumado en un recipiente de acero precalentado ($\pm 75^{\circ}C$) para un tiempo de rocío calculado para 500g de asfalto. Inmediatamente después que pare la descarga de espuma, inicie el cronómetro.



Paso 5. Usando la varilla de medición suministrada con la Wirtgen WLB10S (la cual esta calibrada para un recipiente de acero de 275mm de diámetro y 500g de asfalto) mida la altura máxima del asfalto en el recipiente. Esto se toma como el volumen máximo.



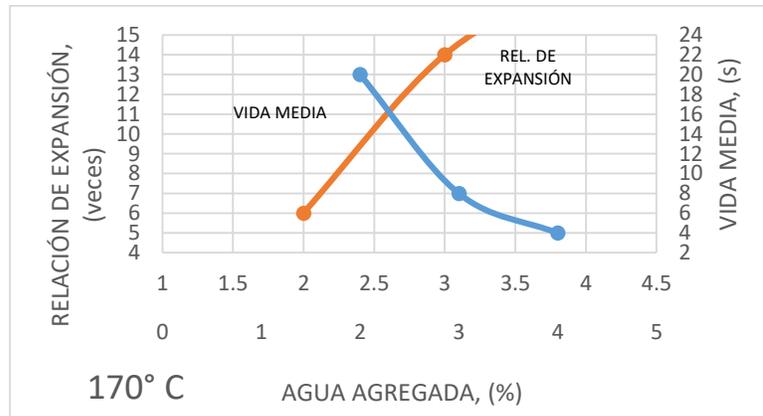
Paso 6. Use el cronómetro para medir el tiempo en segundos que le toma a la espuma reducirse a la mitad de su volumen máximo. Esto es tomado como la vida media del asfalto espumado.



Paso 7. Repita el procedimiento anterior tres veces o hasta que se obtengan lecturas similares.

Paso 8. Repita los pasos 3 a 7 para para al menos 3 rangos de inyección de agua. Utilizando regularmente valores de 2%, 3% y 4% de la masa de asfalto.

Paso 9. Dibuje una gráfica de la relación de expansión contra la vida media de las diferentes cantidades de agua en el mismo sistema de ejes. (Vea el ejemplo en la gráfica de abajo). El valor óptimo de agua a agregar es el promedio de los dos contenidos de agua requeridos para alcanzar esos mínimos requerimientos.

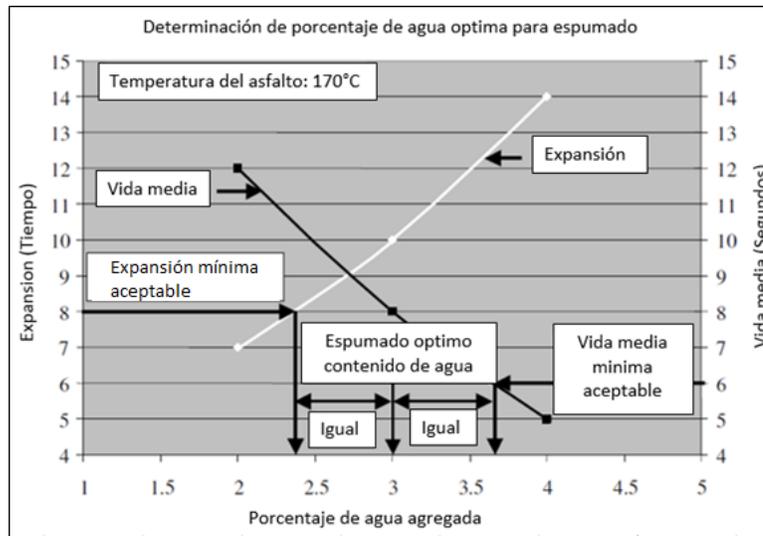


Repita los pasos 1 a 9 para otras dos temperaturas de asfalto (Normalmente 170°C y 180°C).

La temperatura y la adición óptima de agua que produzca la mejor espuma es la utilizada en el procedimiento de diseño de mezcla que se describe abajo.

Nota: Las propiedades espumantes absolutas mínimas que son aceptables para una estabilización efectiva (Temperatura del material de 25°C) son:

Relación de expansión: 8 Veces Vida media: 6 segundos



NOTA: Si estos requisitos mínimos no se cumplen, el asfalto debe ser rechazado para su uso.

3. REQUERIMIENTO DE FILLER ACTIVO

3.1. EFECTO DE PLASTICIDAD

La estabilización de asfalto espumado normalmente se lleva a cabo con una combinación de una pequeña cantidad (1% de masa) de *filler* activo (cemento o cal hidratada) para mejorar la dispersión del asfalto y reducir la susceptibilidad a la humedad. El índice plástico (IP) del material es normalmente utilizado como una guía para el uso de cal hidratada o cemento en la mezcla. Dicho *filler* activo se le denominará relleno activo. A continuación se muestra un parteaguas de la cantidad de relleno activo a utilizar partiendo de la siguiente tabla:

ÍNDICE PLÁSTICO > 10	ÍNDICE PLÁSTICO < 10
Pre-tratamiento del material con cal hidratada CIC (Consumo Inicial de Cal) se debe determinar primero mediante la prueba de pH apropiada.	Llevar a cabo pruebas con especímenes de 100 mmØ para determinar la necesidad de añadir cemento o cal hidratada.

El pre-tratamiento del material con IP > 10 requiere que la cal y el agua sean añadidos por lo menos 2 horas antes de la adición del asfalto espumado. El material pre-tratado se coloca en un recipiente hermético para contener la humedad. Se comprueba el contenido de humedad, y si es necesario se ajusta dicha humedad antes de añadir el asfalto estabilizante.

3.2. DETERMINACION DEL REQUERIMIENTO DE RELLENO ACTIVO

Cuando el IP < 10, se necesita de un relleno activo y un tipo de relleno activo en específico (cemento o cal hidratada) apropiado para el material, este deberá ser determinado por las pruebas ITS con especímenes de 100mm de diámetro para tres diferentes mezclas hechas de la misma muestra de material.

La cantidad de asfalto espumado a añadir a cada una de las tres mezclas es constante, utilizando como referencia los datos obtenidos en la sección F.1 dicho valor se muestra la siguiente tabla:

GUÍA PARA ESTIMAR LA ADICIÓN ÓPTIMA DE ASFALTO ESPUMADO			
FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA 0.075mm (%)	ADICIÓN DE ASFALTO ESPUMADO		TIPO DE MATERIAL TÍPICO
	FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA 4.75mm		
	<50%	>50%	
<4	2.0	2.0	ASFALTO RECICLADO (RAP)
4-7	2.2	2.4	RAP/GRAVA TRITURADA/ GRAVA NATURAL/MEZCLAS
7-10	2.4	2.8	
>10	2.6	3.2	GRAVAS/ARENAS

La primera de las tres mezclas no contiene relleno activo, la segunda mezcla se le añade 1% de cemento y la tercera mezcla el 1% de cal hidratada, las tres mezclas son tratadas con la misma cantidad de asfalto espumado. El material de cada una de las tres mezclas es utilizado para elaborar especímenes de 100mm de diámetro las cuales son curadas y probadas para determinar los valores de ITS-DRY e ITS-WET, los cuales se describen en la sección 4 y 5 de este manual. Dichos

valores proveen el valor TSR el cual es utilizado como principal indicador para conocer si se requiere un relleno activo.

Cuando el valor de TSR para la mezcla sin relleno activo excede el 60%, el diseño de mezcla debe realizarse sin relleno activo. Esta situación limita generalmente a materiales que constan de buena calidad con grava triturada, regularmente incluyendo una proporción significativa de asfalto recuperado RAP.

Por el contrario cuando el valor de TSR de la mezcla sin relleno activo es menor de 60%, la mezcla que produzca un valor significativamente más alto en comparación a la mezcla sin relleno activo (>5%) indica una preferencia por el cemento o la cal hidratada según sea el caso, y deberá ser utilizada para las siguientes mezclas de diseño. Si el valor de TSR para ambos contenidos de relleno activos son del mismo orden (diferencia <5%) entonces cualquier el tipo de relleno activo es el adecuado.

NOTA: Para cualquier de los casos se recomienda leer el presente manual por completo para conocer la elaboración de los especímenes así como la metodología de la misma.

3.3. PROPORCIÓN REPRESENTATIVA

Separe el material de la muestra en las siguientes fracciones.

- Retenido en la malla 19mm
- Pasa 19mm, pero retiene 13.2 mm
- Pasa 13.2 mm, pero retiene en la 4.75mm
- Pasa 4.75mm

Reconstituya las muestras representativas de acuerdo a la graduación determinada debajo para la proporción que pasa la malla 19mm. Sustituya la proporción retenida en la malla 19mm con material que pase la malla 19mm y es retenida en la malla 13.2mm. El ejemplo en la tabla debajo explica el procedimiento:

ANÁLISIS DE MALLA		CANTIDAD DE MATERIAL A SER INCLUIDO POR CADA 10 KG DE MUESTRA		
TAMAÑO DE MALLA (mm)	PORCENTAJE QUE PASA	PASA 4.75 MM	PASA 12.3 MM Y RETIENE EN 4.75MM	PASA 19MM Y RETENIE EN 13.2
19	90.5	$(53.6 / 100 \times 10,000)$ = 5,360 g	$((72.3-53.6) / 100 \times 10,000)$ = 1,870 g	$((100-72.3) / 100 \times 10,000)$ = 2,770 g
13.2	72.3			
4.75	53.6			

NOTA: Si el material que pasa el tamiz 19 mm y que es retenido en el tamiz 13.2 mm es insuficiente, es válido disgregar el material retenido en el tamiz de 19,0 mm.

4. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA PARA TRATAMIENTO CON ASFALTO ESPUMADO.

Una vez conocido el relleno activo a utilizar, prepare el material para el tratamiento con asfalto espumado de la siguiente manera.

Paso 1. Coloque de 20 a 25kg de muestra preparada en la revoladora de la Wirtgen WLM30.



Paso 2. Determine el peso seco de la muestra mediante la ecuación 1.

$$M_{muestra} = \frac{M_{secado\ al\ aire}}{\left(1 + \left(\frac{W_{secado\ al\ aire}}{100}\right)\right)} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde:

$$M_{muestra} = \text{masa seca de la muestra} \quad \text{[g]}$$

$$M_{secada\ al\ aire} = \text{masa de la muestra secada al aire} \quad \text{[g]}$$

$$W_{secado\ al\ aire} = \text{contenido de humedad de la muestra secada.} \quad \text{[% de masa]}$$

EJEMPLO

$$M_{muestra} = \frac{M_{secado\ al\ aire}}{\left(1 + \left(\frac{W_{secado\ al\ aire}}{100}\right)\right)}$$

Paso 3. Determine el porcentaje de relleno activo (cal o cemento) usando la ecuación 2.

$$M_{cemento} = \left(\frac{C_{agregado}}{100}\right) \times M_{muestra} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

$$M_{cemento} = \text{masa de cal o cemento a ser agregado} \quad \text{[g]}$$

$$C_{agregado} = \text{porcentaje de cal o cemento requerido} \quad \text{[% de masa]}$$

$$M_{muestra} = \text{Masa seca de la muestra} \quad \text{[g]}$$

EJEMPLO

$$M_{\text{asfalto}} = \left(\frac{1}{100}\right) \times (23,250) = 232.5\text{g}$$

Paso 4. Determine el porcentaje de agua a agregar para un contenido óptimo de humedad de la mezcla como es calculado usando la ecuación 3. La cantidad de agua a agregar a la muestra es determinada usando la ecuación 4. Dicha ecuación tiene como objetivo alcanzar el 75% de humedad óptima del material antes de la inyección de asfalto espumado

$W_{\text{agregar}} = 0.75W_{\text{OMC}} - W_{\text{secado al aire}}$	[Ecuación 3]
---	--------------

$M_{\text{agua}} = \left(\frac{W_{\text{agregar}}}{100}\right) \times (M_{\text{muestra}} + M_{\text{cemento}})$	[Ecuación 4]
--	--------------

Donde:

W_{agregar} = agua a agregar a la muestra [% de masa]

W_{OMC} = contenido de agua óptimo [% de masa]

$W_{\text{secado al aire}}$ = agua en la muestra secada al aire [% de masa]

M_{agua} = masa de agua a agregar [g]

M_{muestra} = masa seca de la muestra [g]

M_{cemento} = peso de cal o cemento a agregar [g]

EJEMPLO

$$W_{agregar} = (0.75 * (6)) - (2) = 2.5\% \text{ de masa}$$

$$M_{agua} = \left(\frac{2.5}{100}\right) x (23,250 + 232.5) = 587.06 \text{ g}$$



Paso 5. Mezcle el material, el relleno activo y el agua en la mezcladora hasta que sea uniforme.

Nota: Inspeccione la muestra después de mezclar, esto para asegurar que el material mezclado no está pegado en las paredes del mezclador. Si esto ocurre, mezcle una nueva muestra utilizando un menor contenido de humedad. Compruebe que el material se mezcla fácilmente y mantiene un estado “esponjoso”. Si se observa cualquier fino al final de la mezcla, agregue una pequeña cantidad de agua y revuelva, hasta que el estado “esponjoso” se alcance sin finos.

Recomendación: Comenzar un ciclo de 60 segundos con el material y el relleno activo, una vez finalizado dicho ciclo, iniciar un ciclo adicional añadiendo el agua a agregar a la muestra por la Ecuación 4.

Paso 6. Determine la cantidad de asfalto espumado a agregar usando la ecuación 5.

$$M_{asfalto} = \left(\frac{B_{agregado}}{100}\right) x (M_{muestra} + M_{cemento}) \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde: $M_{asfalto}$ = Masa de asfalto espumado a agregar [g]

$B_{agregado}$ = Contenido de asfalto espumado [% de masa]

$M_{muestra}$ = peso seco de la muestra [g]

$M_{cemento}$ = masa de cal o cemento agregado [g]

EJEMPLO

$$M_{asfalto} = \left(\frac{2.0}{100}\right) x (23,250 + 232.5) = 469.65 \text{ g}$$

Paso 7. Ajuste el temporizador en la Wirtgen WLB10 S usando la ecuación 6:

$$T = \left(\frac{M_{asfalto}}{Q_{asfalto}}\right) \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde:

T = Tiempo a colocar en el reloj de la WLB10 S [s]

$M_{asfalto}$ = masa de asfalto espumado a agregar [g]

$Q_{asfalto}$ = Velocidad del flujo de asfalto en la WLB 10S [g/s]

EJEMPLO

$$T = \left(\frac{469.65}{100}\right) = 4.7 \text{ s}$$

Paso 8. Coloque la mezcladora adyacente a la unidad de formación de espuma de manera que el asfalto espumado pueda ser descargado directamente en la cámara de mezclado.



Paso 9. Encienda el mezclador y deje que se mezcle por al menos 10 segundos antes de descargar la masa requerida de asfalto espumado en la cámara de mezclado. Aplique la descarga de asfalto espumado Después de que el asfalto espumado ha sido descargado en el mezclador, continúe mezclando por 30 segundos más, o hasta que se haya mezclado uniformemente.

Paso 10. Determine la cantidad de agua requerida para traer la muestra al Contenido de Humedad Óptimo usando la ecuación 7. Esta ecuación tiene como objetivo añadir el 25% de agua restante después de haber aplicado la inyección de asfalto espumado.

$M_{plus} = \frac{M_{agua}}{3}$	[Ecuación 7]
---------------------------------	--------------

Donde:

M_{plus} = Masa de agua a agregar [g]

M_{agua} = masa de agua a agregar [g]

EJEMPLO

$$M_{plus} = \frac{587.06}{3} = 195.69g$$

Paso 11. Agregar el agua adicional calculado en el paso anterior y mezcle hasta que este uniforme.



Paso 12. Libere la palanca para poder descargar el material tratado con asfalto espumado, realice la homogenización y cuarteos del mismo, transfiera a un recipiente hermético y selle inmediatamente para retener la humedad. Para minimizar la pérdida de humedad de las muestras, elabore los especímenes

tan pronto como sea posible siguiendo el procedimiento pertinente para especímenes de 100mm o 150mm, los cuales se exponen en el apartado 4.



Repita los pasos de arriba para al menos cuatro mezclas con diferente contenido de asfalto espumado, con intervalos de 0.2% de asfalto. A continuación se presenta una guía para estimar la adición óptima de asfalto espumado, según las características del material.



GUÍA PARA ESTIMAR LA ADICIÓN ÓPTIMA DE ASFALTO ESPUMADO			
FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA 0.075mm (%)	ADICIÓN DE ASFALTO ESPUMADO		TIPO DE MATERIAL TÍPICO
	FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA 4.75mm		
	<50%	>50%	
<4	2.0	2.0	ASFALTO RECICLADO (RAP)
4-7	2.2	2.4	RAP/GRAVA TRITURADA/ GRAVA NATURAL/MEZCLAS
7-10	2.4	2.8	
>10	2.6	3.2	GRAVAS/ARENAS

Ejemplo.- Si el material consiste en una mezcla de RAP y grava triturada con 43% y 6% que pasan la malla 4.75mm y 0.075mm respectivamente, la guía anterior indica una adición óptima de asfalto de 2.2%; por lo cual la cantidad de asfalto a añadir a cada muestra (utilizando la misma cantidad de relleno activo y la misma cantidad de humedad) es:

Muestra 1: 1.9%

Muestra 2: 2.1%

Muestra 3: 2.3%

Muestra 4: 2.5%

5. FABRICACIÓN DE PROBETAS

Los procedimientos descritos a continuación son para la fabricación de dos tamaños diferentes de especímenes empleando diferentes procedimientos de compactación:

TAMAÑO DEL ESPÉCIMEN Y ESFUERZO DE COMPACTACIÓN APLICADO EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN		
DIAMETRO DEL ESPÉCIMEN	ALTURA DEL ESPÉCIMEN	ESFUERZO DE COMPACTACIÓN
100 mm	63.5 mm	Marshall Modificada (75 golpes por cara)
150 mm	95.0 mm	AASHTO Modificada

NOTA: Los procedimientos de compactación que se describen a continuación, son procedimientos estándar bien conocidos, los cuales se pueden llevar a cabo en la mayoría de los laboratorios en todo el mundo. Sin embargo pueden ser utilizados otros procedimientos (por ejemplo, Compactador Giratorio, Martillo Vibratorio, Mesa Vibratoria, etc.) siempre que éstos logren el mismo objetivo, es decir la densidad del 100% para la compactación Marshall de las probetas con diámetro de 100 mm o 100% de la densidad para la prueba AASHTO Modificada T-180 con especímenes de 150 mm de diámetro.

5.1. COMPACTACIÓN MARSHALL PARA PROBETAS CON DIAMETRO DE 100mm

Se requieren un mínimo de seis especímenes de 100 mm de diámetro, y 63.5 mm de altura, estos especímenes o probetas se fabrican a partir de cada muestra de material tratado mediante la aplicación de energía de compactación Marshall modificado, tal como se describe en los siguientes pasos:

Paso 1. Prepare el martillo y el molde Marshall limpiando el cuello, molde, placa base y la cara del martillo de compactación.

NOTA: El equipo de compactación no debe ser calentado, pero manténgase a temperatura ambiente.

Paso 2. Pese suficiente material para alcanzar una altura compactada de 63.5mm \pm 1.5mm (Aproximadamente 1100 g para la mayoría de los materiales). Introducir la mezcla con una espátula 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en la superficie, dejando la superficie ligeramente redondeada.



Paso 3. Compacte la mezcla con la aplicación de 75 golpes con el martillo de compactación. Se debe tener cuidado para asegurar la continua caída libre del martillo.

Paso 4. Remueva el molde y el collarín de su pedestal, invierta el espécimen (hacia abajo). Colóquelo y presione hacia abajo firmemente hasta asegurarlo en la base del plato. Compacte la otra cara del espécimen con 75 golpes más.

Paso 5. Después de la compactación, retire el molde de la placa de base y extraiga la probeta mediante un extractor hidráulico; Mida la altura de la muestra y ajuste la cantidad de material si la altura no está dentro de los límites de 1.5 mm.

Nota: Los materiales gruesos o no cohesivos a menudo se dañan durante el proceso de extracción. Por ello se recomienda que los especímenes se dejen en sus moldes durante 24 horas permitiendo desarrollar la fuerza suficiente antes de ser extraídos.

Paso 6. Tome ± 1 kg de muestras representativas después de la compactación de un segundo y quinto espécimen y seque a masa constante (40°C). Determine la humedad del modelado usando la ecuación 8:

$W_{molde} = \frac{M_{muestra} - M_{seco}}{M_{seco}} \times 100$	[Ecuación 8]
--	--------------

Donde:

W_{molde} = Contenido de humedad del modelado [% de masa]

$M_{muestra}$ = peso del material humedo [g]

M_{seco} = peso de material seco [g]

Ejemplo:

$$W_{probeta} = \frac{1000 - 940}{940} * 100 = 6.4\%$$

5.2. COMPACTACIÓN AASHTO MOD. PARA PROBETAS CON DIAMETRO DE 150mm

Se requieren un mínimo de seis especímenes de 150 mm de diámetro, y 95 mm de altura, estos especímenes o probetas se fabrican a partir de cada muestra de material tratado mediante la aplicación de energía de compactación AASHTO (T-180) Modificada, tal como se describe en los siguientes pasos:

Paso 1. Prepare el equipo limpiando el cuello, molde, placa base y la cara del pisón de compactación. [Cualquier molde estándar "Proctor" puede ser utilizado, cada uno equipado con un espaciador de 32 mm colocado en la placa base para lograr especímenes de 95 mm de altura. ($\pm 1,5$ mm)]

Coloque los especímenes (ya sea 100mm ó 150mm de diámetro) en un horno secado a temperatura de masa constante a 40°C (Normalmente 72 Hrs.)

Para determinar si se ha logrado la masa constante, pese los especímenes y póngalos de nuevo en el horno. Después de 4 horas retire las muestras del horno y pese nuevamente. Si la masa es constante, entonces continúe con el ensaye; Si la masa no es constante, ponga las muestras de nuevo en el horno y pese nuevamente en intervalos de 4 horas hasta que se alcance una masa constante.



Cuando se ha logrado la masa constante, retire los especímenes del horno y permita enfriar los especímenes a 25°C ($\pm 2.0^\circ\text{C}$).

Nota: Si la elaboración de las probetas fueron requeridos papel filtro, cuidar de que los mismos sean retirados lo antes posible, ya sea antes de ingresar las probetas al horno o después de lograr la masa constante, procurando no dañar los especímenes.

6.2. CURADO SIMULANDO LAS CONDICIONES DE CAMPO - ITS EQUIL

Coloque los especímenes de 150mm de diámetro en un horno de secado a temperatura de masa constante a 30°C aproximadamente por 20 horas (Hasta que el contenido de humedad haya reducido aproximadamente al 50% del Contenido Óptimo de Humedad)

Tome los especímenes del horno, coloque cada uno en una bolsa sellada (al menos del doble del volumen del espécimen), regrese los especímenes al horno a 40°C durante otras 48 horas.



Retire los especímenes del horno después de las 48 horas y saque las muestras de sus respectivas bolsas, asegurando que la humedad dentro de las bolsas no entre en contacto con el espécimen. Permita enfriar los especímenes a 25°C ($\pm 2.0^\circ\text{C}$).



Nota: Si la elaboración de las probetas fueron requeridos papel filtro, cuidar de que los mismos sean retirados lo antes posible, ya sea antes de ingresar las probetas al horno o después de lograr la masa constante, procurando no dañar los especímenes.

6.3. PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES PARA LOS ENSAYOS

Después de enfriar a temperatura ambiente, determine la densidad aparente de cada muestra utilizando el siguiente procedimiento:

Paso 1. Determine la masa (M_{spec}).



Paso 2. Mida la altura del espécimen en cuatro puntos separados alrededor de la circunferencia y calcule una altura promedio (h).



Paso 3. Mida el diámetro (d).



Paso 4. Calcule la densidad de masa usando la ecuación 10.

$BD_{spec} = \left(\frac{4 \times M_{spec}}{\pi \times d^2 \times h} \right) \times 1'000,000$	[Ecuación 10]
---	---------------

Dónde:

BD_{spec} = Densidad de masa	[kg/m3]
M_{spec} = Masa del espécimen	[g]
h= Altura promedio del espécimen	[mm]
d= Diámetro del espécimen.	[mm]

Ejemplo:

$$BD_{spec} = \left(\frac{4 \times 1175}{\pi \times 100^2 \times 63.5} \right) \times 1'000,000 = 2356 \text{ Kg/m}^3$$

Nota: Excluya de las pruebas futuras cualquier espécimen el cual su densidad de masa difiera de la densidad de masa promedio de los 6 especímenes en más del 2.5%

Paso 5. Coloque la mitad de los especímenes (regularmente 3) bajo el agua en un baño de saturación por 24 horas a 25°C (± 2.0° C). Después de 24 horas, extraiga los especímenes del agua, seque la superficie y ensaye inmediatamente.



7. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA. (ITS)

La resistencia a la tracción indirecta es determinada por la última carga medida antes de la falla aplicada al eje sobre el diámetro de la probeta, con un rango de deformación constante de 50.8 mm/min. Asegure que la temperatura de los especímenes sea 25°C ($\pm 2.0^\circ$ C) y sigan los procedimientos descritos debajo:

Paso 1. Coloque la muestra en su respectiva plantilla para espécimen de 100mm o 150mm de diámetro. (Asegúrese que las tiras de carga son las apropiadas para el diámetro del espécimen). Posicione la muestra de manera que las líneas de carga estén paralelas y centradas en el plano diametral vertical.



Paso 2. Coloque la placa de transferencia de carga en la banda de soporte superior y posicione la plantilla de soporte centrada bajo el dispositivo medidor de carga de ensayo de compresión.



Paso 3. Aplique la carga al espécimen, de forma gradual, a una velocidad de carga de 50.8mm por minuto hasta alcanzar la carga máxima.



Paso 4. Registre la carga máxima P (en kN), aproximando a 0.1kN.

Paso 5. Registre el desplazamiento al momento de la ruptura con precisión a 0.1mm



Paso 6. Inmediatamente después de probar el espécimen, rómpalo por la mitad y registre la temperatura al centro del mismo.



Paso 7. Tome una muestra a partir de los especímenes NO sumergidos en agua para determinar el contenido de agua al momento de la falla. Determine el contenido de humedad del espécimen mediante la ecuación 11:

$$W_{spec} = \frac{M_{muestra} - M_{seco}}{M_{seco}} \times 100 \quad \text{[Ecuación 11]}$$

Dónde:

W_{spec} = Contenido de humedad del espécimen [% de masa]
 $M_{muestra}$ = peso del material humedo [g]
 M_{seco} = peso del material seco [g]

Ejemplo:

$$W_{probeta} = \frac{1000 - 940}{940} * 100 = 6.4\%$$

Paso 8. Determine la densidad seca de cada espécimen empleando la ecuación 12:

$$DD_{spec} = BD_{spec} \times \left(1 - \frac{W_{spec}}{100} \right) \quad \text{[Ecuación 12]}$$

Dónde:

DD_{spec} = Densidad seca del espécimen [kg/m³]
 BD_{spec} = Densidad de masa [kg/m³]
 W_{spec} = *Contenido de humedad del espécimen* [% de masa]
Ejemplo:

$$DD_{spec} = 2356 / \left(1 + \frac{6.4}{100}\right) = 2214.3 \text{ Kg/m}^3$$

Paso 9. Calcule el valor de ITS para cada espécimen con aproximación a 1 kPa utilizando la ecuación 13:

$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d}$	[Ecuación 13]
--	---------------

Dónde:

ITS = Resistencia a la Tracción Indirecta. [kPa]
P = Carga máxima aplicada [kN]
h = Altura promedio del espécimen [kN]
d = Diámetro del espécimen [kN]

Ejemplo:

$$ITS = \frac{2 \times 5.4}{\pi \times 95 \times 150} * 1'000,000 = 241.2 \text{ Kpa}$$

Paso 10. Para los especímenes curados, calcule la Resistencia a la Tracción Retenida (TSR). La cual es la relación entre el promedio de los valores de ITS húmedo y sin humedecer para un grupo específico de especímenes, expresado como un porcentaje usando la ecuación 14:

$TSR = \frac{\text{Ave ITS}_{WET}}{\text{Ave ITS}_{DRY}} \times 100$	[Ecuación 14]
--	---------------

Ave ITS_{WET} = Valores ITS Húmedos Promedio [kPa]
Ave ITS_{DRY} = Valores ITS Secos Promedio [kPa]

Ejemplo:

$$TSR = \frac{166}{245} \times 100 = 68\%$$

Nota: Para poder diferenciar entre los resultados obtenidos de diferentes regímenes de curado, la terminología mostrada en la tabla debajo es adoptada para evitar cualquier confusión.

TERMINOLOGÍA	DIAMETRO DE ESPÉCIMEN	REGIMEN DE CURADO	CONTENIDO DE HUMEDAD
ITS SECO	100 mm o 150 mm	72 hrs no selladas	<1%
ITS SATURADO		SECO + 24 hrs sumergidas	Saturadas
ITS EQUILIBRIO	150 mm Solamente	20 hrs no selladas, 48 hrs en bolsa sellada	+/- 50% del Contenido de Humedad Óptima
ITS SUMERGIDO		EQUIL +24 hrs sumergidas	Semi-Saturadas

8. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA (ITS)

Trazar respectivamente los resultados de los ensayos ITS saturados y no saturados, contra la adición correspondiente de asfalto espumado, como se muestra posteriormente en el ejemplo.

Si se han obtenido resultados para dos regímenes de curado diferentes, cada uno debe ser trazado en un gráfico separado.

El asfalto espumado añadido que cumpla el valor mínimo de ITS para la clasificación de material requerido es el seleccionado como el primer indicador de la cantidad mínima de asfalto espumado a añadir. Es entonces que se utiliza el criterio ingenieril para determinar la cantidad de asfalto espumado que se requiere añadir con el propósito de alcanzar la suficiente confianza, basado en la variabilidad de las pruebas (tal como una “Bondad de ajuste” como una regresión de curva, o una línea atrás de los resultados de las pruebas realizadas.

A continuación se muestra una tabla la cual muestra valores mínimos para el tipo de clasificación de mezcla estabilizada mediante el asfalto espumado.

Clase 1 MEA:

Son materiales con alta resistencia al corte. Estos materiales son adecuados para la construcción de capa de la capa base en pavimentos con una capacidad estructural de más de 3 millones de ESALs (donde se recomienda el modelado analítico para el diseño del pavimento).

Clase 2 MEA:

Son materiales con resistencia al corte moderado. Estos materiales son adecuados para la construcción de la capa base en pavimentos con una capacidad estructural de menos de 3 millones de ESALs (donde los métodos empíricos (métodos SN y PN) son adecuados para pavimento diseño).

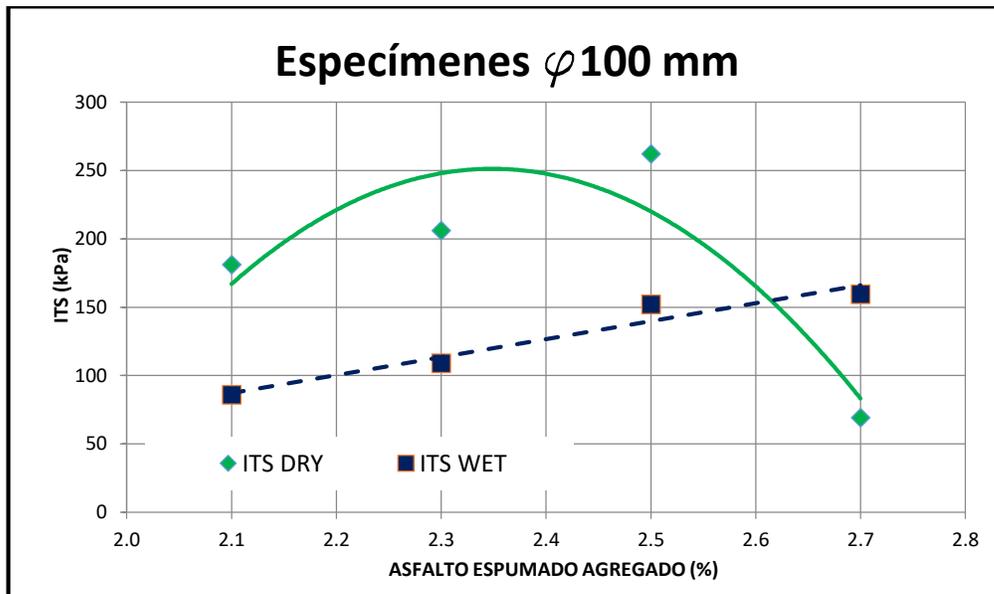
INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS ITS				
PRUEBA	DIAMETRO DE ESPÉCIMEN	CLASE 1 MEA	CLASE 2 MEA	PROPÓSITO
ITS _{DRY}	100MM	>225	175 - 225	Indica el contenido óptimo de asfalto
ITS _{WET}	100MM	>100	75 -100	Indica la necesidad de <i>filler</i>
ITS _{EQUIL}	150MM	>175	135-175	Optimiza el contenido de asfalto
ITS _{EQUIL-SAT}	150MM	>100	N/A	Optimiza el contenido de asfalto

EJEMPLO

La tabla y el gráfico de resultados de las pruebas ITS se muestra a continuación, los cuales son valores típicos obtenidos a partir de un diseño de la mezcla mediante el uso de muestras de 100 mm de diámetro para un material granular natural tratado con asfalto espumado. La curva a través de los cuatro puntos ITS-DRY aproxima a la relación entre ITS-DRY y la adición de asfalto espumado.

La línea que pasa por los cuatro puntos ITS-WET aproxima a la relación entre ITS-WET y a la adición de asfalto espumado. La línea punteada indica el comportamiento del material conforme a la adición de entre el 2.3% y el 2.5% asfalto espumado. Dicho análisis cumple los requisitos para la CLASE I estabilizada con asfalto espumado. (ITS-DRY > 225 kPa y ITSWET > 100 kPa)

ASFALTO AÑADIDO (%)	ITS DRY (KPA)	ITS SOAK (KPA)	TSR (%)
2.1	181	86	47.5
2.3	206	109	52.9
2.5	262	152	58
2.7	244	169	69.3



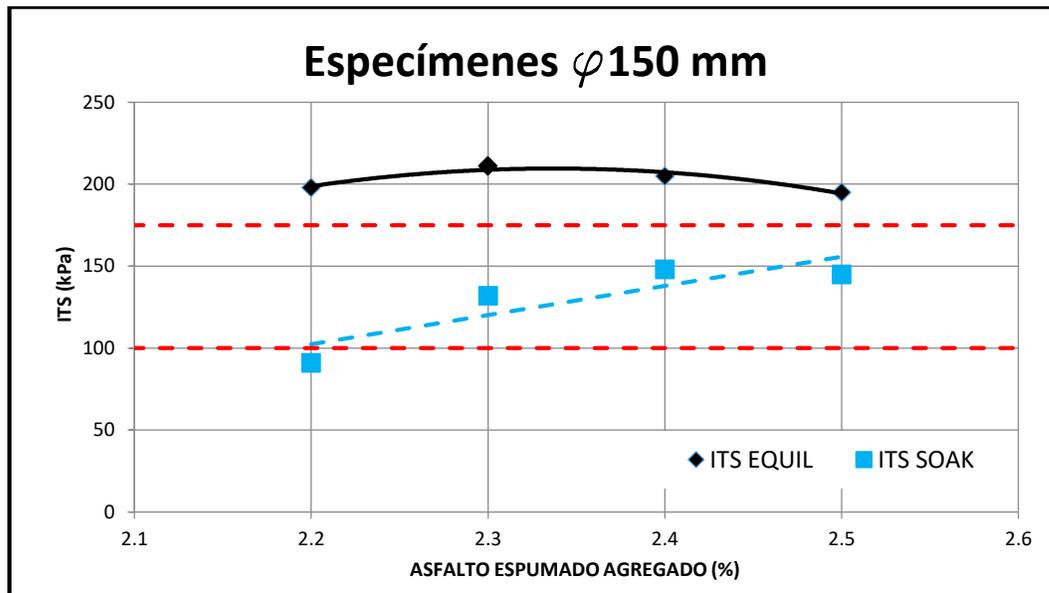
COMENTARIOS.- Los valores de TSR indican que el material sigue siendo susceptible de humedad después del tratamiento con asfalto espumado, especialmente cuando la proporción aplicada está por debajo del 2.3% (es decir, valor TSR <50%). Por lo tanto, es importante asegurarse de que el asfalto aplicado sea el suficiente para alcanzar el valor mínimo ITS-WET necesario para poder cumplir los requisitos para la clasificación de Clase 1.

Se aplica entonces un juicio ingenieril, basado en el entendimiento de que sus valores no son absolutos, así como la consideración que se debe esperar variabilidad al reciclar material de un pavimento existente. Los resultados obtenidos a partir de la mezcla con 2.3% de asfalto espumado añadido no cumplen con el requisito de la **Clase 1** para los ITS-DRY mientras tanto los valores de ITSDRY y ITSWET para una mezcla con 2.5% asfalto espumado añadido están muy por encima de los requisitos mínimos de la Clase 1. Esto sugiere que se requiere una tasa de aplicación mínima de 2.4% asfalto espumado.

Para aumentar el nivel de confianza, adicionalmente se pueden elaborar especímenes de 150mm de diámetro con intervalos de 0.1% de adición de asfalto espumado, en un rango del 2.2% al 2.5% de adición de asfalto espumado, y curar los especímenes a un contenido de humedad de equilibrio (Ensayar los especímenes con un contenido de humedad de equilibrio elimina las fuerzas de succión que elevan los valores de la prueba ITS-DRY con una consecuente reducción de valores de TSR). La tabla y la gráfica anteriormente mostrada posteriormente exponen resultados típicos que podrían ser alcanzados, y así superponerse con un los limites mínimos para ITS-EQUIL e ITS-SOAK requeridos para la Clase 1 de materiales estabilizados con asfalto espumado.

(ITS-EQUIL > 175 kPa ; ITS-SOAK > 100 kPa).

ASFALTO AÑADIDO (%)	ITS EQUIL (KPA)	ITS SOAK (KPA)
2.2	198	91
2.3	211	132
2.4	205	148
2.5	195	145



Este ejemplo refleja el mayor nivel de confianza, el cual se adquiere al tomar la decisión de añadir 2.3% asfalto espumado a la mezcla para asegurar así que los requisitos mínimos para una Clase 1 de Materiales Estabilizados con Asfalto han sido cumplidos.

9. PRUEBA TRIAXIAL

Se ha desarrollado una variante de la prueba triaxial simple (STT) para facilitar las pruebas triaxiales en laboratorios estándar. El aparato para pruebas triaxiales sólo es aplicable mediante una carga monotonía para obtener así valores de cohesión y ángulo de fricción.

La cohesión, ángulo de fricción y el módulo tangente se usan en la clasificación de los Materiales Estabilizados con Asfalto (MEA). Los límites utilizados para interpretar los datos de las dos clases de materiales se muestran a continuación.

PRUEBA O INDICADOR	MEA 1	MEA 2
COHESION (KPA) [kg/cm ²]	>250 [2.55]	100 a 250 [1.02-2.55]
ÁNGULO DE FRICCIÓN (°)	>40	30 a 40

9.1. DETERMINACIÓN DE PARAMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE MEDIANTE ENSAYOS TRIAXIALES.

Este método describe la determinación de los parámetros de corte triaxiales (cohesión y ángulo de fricción interna) en Materiales Estabilizadas con Asfalto mediante la medición de la resistencia de falla (monotónica) en especímenes con un diámetro cilíndrico de 150 mm y 300 ± 2 mm altura.

9.1.1. EQUIPO Y MATERIALES

- Carcasa de acero galvanizado de 5 mm de espesor que comprende un anillo, y abrazaderas mecánicas sencillas en la parte superior e inferior
- Una placa base inferior para asentar el espécimen
- Disco superior
- Tubo de látex de al menos 320 mm de altura.

9.1.2. PREPARACION DEL ESPÉCIMEN

Para los especímenes de 150 mm de diámetro y de 300 mm de altura, dicho procedimiento se realiza mediante la compactación descrita anteriormente.



NOTA: El ensayo de los especímenes de prueba triaxial deberá ser planificada entre 48-72 hrs. Después del procedimiento de curado.

Paso 1. Coloque la probeta, carcasa, anillos y placa base en una cámara, para climatizarlos a una temperatura de 25°C durante la noche anterior a la prueba.



Paso 2. Extraiga los elementos de la carcasa de la cámara de climatización, engrase ligeramente los lados del disco así como la base de la placa superior, esto con el propósito de reducir la fricción que pudieran generar dichos elementos.

Paso 3. Coloque el espécimen en el medio de la placa base.



Paso 4. Introduzca cuidadosamente la carcasa, comprimiendo la cámara de látex alrededor del espécimen. Procure no dañar los bordes de la muestra durante el procedimiento.



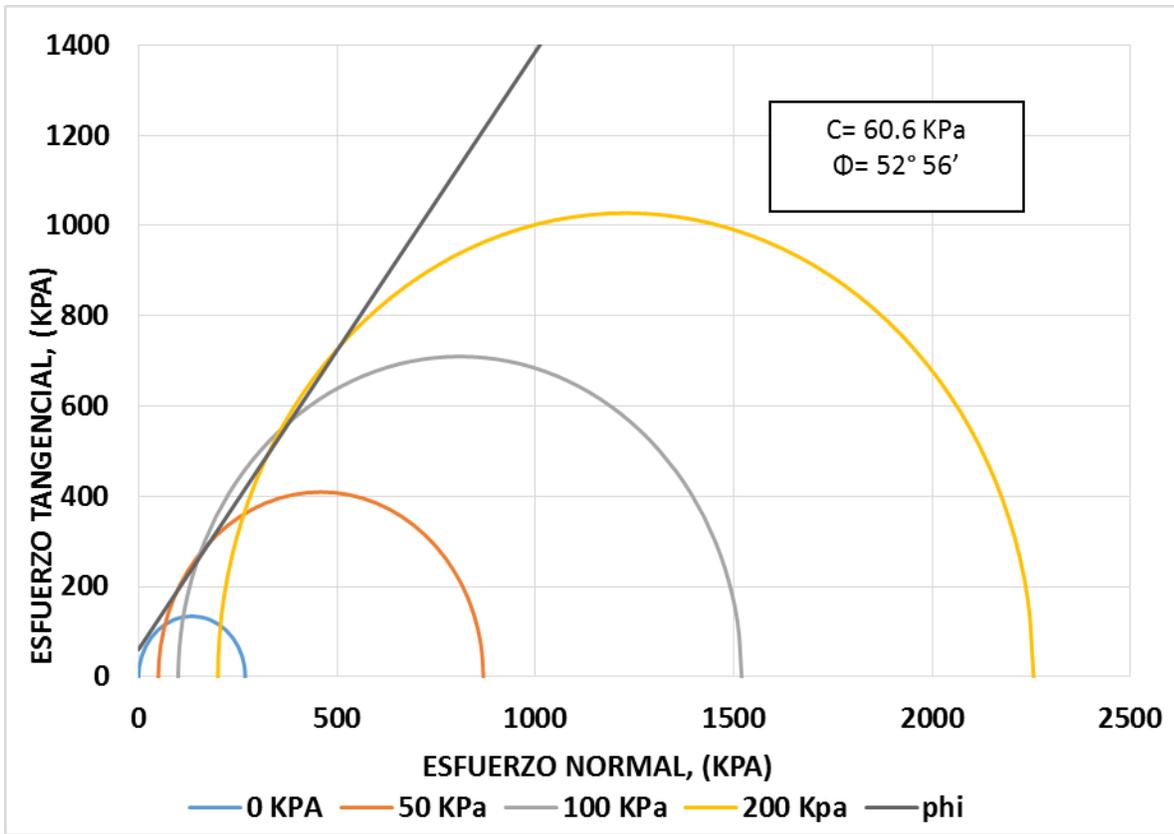
Paso 5. Asegure la carcasa, mediante las abrazaderas y/o tornillos de sujeción.



a) PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

La prueba triaxial se realiza para 4 presiones de confinamiento que son de 0 psi, 7.5 psi (50 Kpa ó 0.51 kg/cm²), 15 psi (100 Kpa ó 1.02 kg/cm²) y 30 psi (200 Kpa ó 2.04 kg/cm²) respectivamente y con cada una de estos confinamientos las probetas se someten a una carga con velocidad constante de 0.3 mm/s. Posteriormente se procesan los datos con el fin de efectuar sus análisis, de esta manera se obtienen los círculos de Mohr así como la envolvente de falla la cual nos brinda gráficamente la cohesión y el ángulo de fricción interna.





10.12 ANEXO L- ESPECIFICACIÓN PARTICULAR PARA EL DISEÑO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO, PROCESADO EN SITIO

1. DEFINICION

La estabilización con asfalto espumado es una técnica para construir una base estabilizada de alta calidad reciclando los materiales del pavimento existente y/o utilizando material virgen. El resultado es una base granular unida discontinuamente mediante la dispersión del asfalto espumado en los finos del material, lo cual mejora la cohesión sin alterar el ángulo de fricción además de disminuir considerablemente la susceptibilidad a la humedad.

Las bases espumadas no son susceptibles a presentar fallas por fisuración y por fatiga, los criterios de falla y vida útil están determinados en función de la deformación permanente producida por la densificación del material.

2. CALIDAD DE LOS MATERIALES RECUPERADOS PARA LA ESTABILIZACIÓN CON ASFALTO ESPUMADO

2.1 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO Y PREPARACION

2.1.1 Muestreo en campo

Como parte de la investigación de campo se realizarán sondeos en todas las capas del pavimento con el objetivo de obtener muestras representativas de la estructura del pavimento. Cada capa del pavimento deberá ser muestreada por separado y por mínimo se deberán obtener 200 kg del material de cada capa que pueda ser intervenida en el proceso de estabilización y por tanto requiera un diseño de mezcla. El número de sondeos dependerá de la longitud del tramo a evaluar y de la homogeneidad del mismo.

***Nota.** Muestras material deben de ser obtenidas de forma representativa, por ejemplo si se va a utilizar la carpeta asfáltica para la fabricación la base estabilizada con asfalto espumado, el material reciclado (RAP) debe ser obtenido con una fresadora (o recicladora) para simular de mejor manera la granulometría que se obtendría durante el proceso de estabilización.*

Las capas a recuperar del pavimento existente dependerán de la rasante que se requiera conservar o del tipo de rehabilitación estructural que requiera el pavimento. Por lo cual, el material recuperado del pavimento existente para la elaboración de la base estabilizada con asfalto espumado puede ser tanto la carpeta asfáltica y la base hidráulica o la base hidráulica y la subbase.

2.2 PRUEBAS ESTÁNDAR A MATERIAL MUESTREADO

El porcentaje a reutilizar de cada una de las capas recicladas (Carpeta-Base o Base-Subbase) dependerá de las características físicas y de la granulometría de cada fracción recuperada.

Se deberán llevar a cabo las siguientes pruebas estándar en el material muestreado de cada capa individual:

- Análisis de mallas para obtener la distribución granulométrica (ASTM D 422)
- Límites Atterberg para determinar el índice de plasticidad (ASTM D 4218)
- Relación Humedad/Densidad (AASHTO T-180).

Los requisitos a evaluar en el material granular se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Características del material granular recuperado

Parámetro	Requerimiento
Índice de Plasticidad	< 6
CBR (%)	> 80
Porcentaje que pasa la malla No. 200 (0.075mm)	> 4
Contenido de humedad	Reportar

2.3 ESTRUCTURA GRANULOMÉTRICA

La granulometría de la muestra combinada deberá cumplir con lo especificado en la sección Tabla 2. Es posible variar las proporciones del material a utilizar o el aporte de material virgen para adaptar la granulometría a los parámetros establecidos en dicha sección.

Tabla 2 Requerimientos granulométricos BSM

No. Malla	Abertura (mm)	Porcentaje que pasa ($\Sigma L > 10^6$)	
		Límite Inferior	Límite Superior
2"	50	100	100
1 ½"	37.5	87	100
1"	25.4	76	100
¾"	19	65	100
½"	12.5	55	90
3/8"	9.5	48	80
¼"	6.4	41	70
No. 4	4.75	35	62
No. 8	2.36	25	47
No. 16	1.18	18	36
No. 30	0.6	13	28
No. 40	0.425	11	25
No. 50	0.3	9	22
No. 100	0.15	6	17
No. 200	0.075	4	12

2.4 PROPORCIONAMIENTO REPRESENTATIVO

Realizar el proporcionamiento de las muestras separando el material a granel en las siguientes 4 fracciones:

1. Retenido en la malla 19.0 mm
2. Pasando malla 19.0, hasta retenido en malla 12.3 mm
3. Pasando malla 12.3, hasta retenido en malla 4.75 mm
4. Pasando malla 4.75 mm

Reconstituir las muestras representativas con las clasificaciones determinadas anteriormente (para la muestra a granel) para la porción que pasa la malla de 19.0 mm. Sustituir la parte retenida en el tamiz de 19.0 mm con el material que pasa la malla de 19.0 mm y retenido en la malla de 12.3 mm.

2.5 CONTENIDO DE HUMEDAD HIGROSCÓPICA

Dos muestras representativas secadas al aire, cada una de aproximadamente 1 kg, se utilizan para determinar el contenido de humedad higroscópica del material. (Nota. Para materiales con graduación más gruesa deberá incrementarse el tamaño de la muestra). Pesar las muestras secadas al aire, con una precisión exacta de 0,1g. Después colocarlas en un horno a una temperatura entre 110 ± 5 °C hasta que sea conseguida masa constante. El contenido de humedad higroscópica (W_{lugar}) es la pérdida de masa expresada en porcentaje con respecto a la masa seca de la muestra. Determinar la humedad higroscópica usando la ecuación 1:

$$W_{lugar} = \frac{(M_{humeda} - M_{seca}) \times 100}{M_{seca}} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde: W_{lugar} = Contenido de humedad higroscópica del lugar [% por masa]
 M_{humeda} = Masa del material secado al aire [g]
 M_{seca} = Masa del material secada en el horno [g]

3. DISEÑO DE MEZCLA

Los procedimientos de diseño de mezcla estándar para estabilización con asfalto espumado se deberán llevar a cabo sobre las muestras de material obtenido del pavimento. El diseño de la base estabilizada con asfalto espumado comprende la preparación del asfalto espumado y tres niveles de diseño, cuales se mencionan a continuación:

- Nivel 0. Determinar las propiedades espumantes del asfalto
- Nivel I. Determinar la necesidad de adición filler activo.

- Nivel II. Determinar el contenido de asfalto espumado.
- Nivel III. Determinar las propiedades mecánicas.

3.1 NIVEL O DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES ESPUMANTES DEL ASFALTO

3.1.1 Calidad del asfalto espumado

Las propiedades de espumado del asfalto son:

- Relación de expansión. Una medida de la viscosidad del asfalto espumado, calculado como la relación del máximo volumen de la espuma en relación con el volumen original del asfalto.
- Vida media. Medida de la estabilidad del asfalto espumado, calculado como el tiempo en segundos que el máximo volumen de espuma colapsa a la mitad del volumen máximo.

3.3.2 Procedimiento para determinar las propiedades del asfalto espumado

El objetivo de llevar a cabo el siguiente procedimiento es determinar la temperatura del asfalto y el porcentaje de adición de agua que es necesario para producir las mejores propiedades de espumado (máxima relación de expansión y vida media) para una fuente particular de asfalto. Estas propiedades son medidas a tres diferentes temperaturas del asfalto (160 a 190 °C) y tres diferentes contenidos de agua (2%, 3% y 4%). Esta determinación se realizará en el equipo Wirtgen WLB 10S "Laboratorio de asfalto espumado"

Para la determinación de la adición óptima de agua por temperatura se deberá trazar la gráfica de relación de expansión versus la vida media en los diferentes contenidos de agua. La adición óptima de agua es escogida como un promedio de los dos contenidos de agua necesarios para cumplir los criterios mínimos de espumado. (Figura 1).

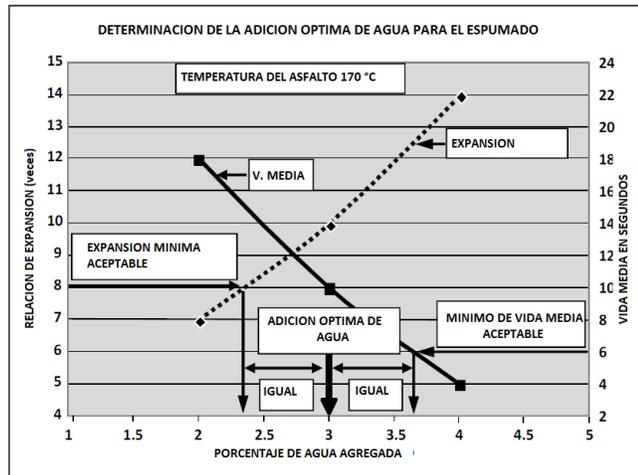


Figura 1 Determinación de la adición óptima de agua para el espumado

La temperatura y la cantidad óptima de agua agregada que produzca las mejores características de espumado será usada en el proceso de diseño de mezcla. Si no se cumplen con los requerimientos mínimos establecidos en la Tabla 3, el asfalto debe ser calificado como no apto para su utilización como asfalto espumado. En ningún caso se deberá utilizar asfaltos modificados con polímeros.

Los valores mínimos de calidad que deberá cumplir el asfalto espumado se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3 Características del asfalto espumado (Límites mínimos)

Temperatura de los agregados	10 a 25 °C	mayor a 25°C
Relación de expansión (veces)	10	8
Vida media (segundos)	6	6

3.2 NIVEL I DETERMINAR DE NECESIDAD DE ADICION DE FILLER ACTIVO

3.2.1 Efecto de la plasticidad

La estabilización con asfalto espumado se lleva a cabo normalmente en combinación con una pequeña cantidad de filler activo debiendo ser 1% máximo en masa (debiendo ser Cemento portland o Cal hidratada) para mejorar la dispersión del asfalto y reducir la susceptibilidad a la humedad, de acuerdo a lo que dicte el diseño de la mezcla. Para fines de la elaboración de su propuesta deberá de considerar el cemento portland como filler activo, si como resultado de diseño de la mezcla que presente el contratista se determina que el filler activo debe ser cal hidratada se realizara el ajusta correspondiente.

El primer criterio a evaluar es el resultado en el ensayo de Límites de Consistencia. Esta prueba además conocer la plasticidad del material, tiene como objetivo conocer mediante

el valor de su Índice Plástico (IP), la posibilidad de que el material a utilizar requiera de un pre-tratamiento antes de ser utilizado de acuerdo a lo establecido en la Tabla 4.

Tabla 4 Determinación de pre-tratamiento con Filler

ÍNDICE PLÁSTICO < 10	ÍNDICE PLÁSTICO > 10
Llevar a cabo pruebas con especímenes de 100 mmØ para determinar la necesidad de añadir cemento o cal hidratada.	Pre-tratamiento del material con cal hidratada CIC (Consumo Inicial de Cal) se debe determinar primero mediante la prueba de pH apropiada.)

3.2.2 Determinación de requerimiento de filler activo

Para determinar cuál Filler activo es el indicado, se elaboran especímenes de 100 mm de diámetro y 63.5 mm de altura, los cuales son sometidos a los ensayos de RTI con el propósito de conocer el valor TSR. Para ello se requieren elaborar 6 especímenes para cada tipo de Filler a analizar, siendo 3 de ellos para condición seca y 3 para condición húmeda, todos a su vez incluyendo un mismo porcentaje de asfalto espumado inicial, el cual es posible estimar a partir de la Tabla **Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..**

Tabla

Inicial de Asfalto Espumado.

Estimación

FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA 0.075mm (%)	ADICIÓN DE ASFALTO ESPUMADO (% DE MASA DEL AGREGADO SECO)		TIPO DE MATERIAL TÍPICO
	FRACCIÓN QUE PASA LA MALLA 4.75mm		
	<50%	>50%	
<4	2.0	2.0	Asfalto Reciclado (RAP)
4-7	2.2	2.4	RAP/Grava triturada
7-10	2.4	2.8	RAP/Grava triturada
>10	2.6	3.2	Gravas/Arenas

3.2.3 Procedimiento de acondicionamiento de los especímenes de ensayo

Después de elaborar los especímenes de ensayo a la densidad requerida, se realiza un procedimiento de acondicionamiento con objetivo simular la condición de campo, así como la humedad más desfavorable del material sometido en campo.

El primero de ellos es un procedimiento estándar para secar las muestras a masa constante denominado RTI_{SECO}. Para el segundo acondicionamiento de Nivel I, se parte de realizar el mismo procedimiento de RTI_{SECO} para posteriormente sumergir el espécimen en agua a 25°C durante 24 hrs, este proceso de curado se le designa RTI_{SATURADO}. Para fines de terminología y proceso de acondicionamiento más detallado se anexa la Tabla .

Tabla 6 Procedimiento de acondicionamiento para Nivel I.

TERMINOLOGÍA	DIAMETRO ESPÉCIMEN	REGIMEN DE CURADO	CONTENIDO DE HUMEDAD	DISEÑO
RTI _{SECO}	100 mm	72 hrs no selladas (40°C)	<1%	Nivel I
RTI _{SATURADO}		RTI _{SECO} + 24 hrs sumergidas (25°C)	Saturadas	

3.2.4 Resistencia a la Tensión Indirecta

El ensayo de Resistencia a la Tensión Indirecta (o ITS, Indirect Tensile Strength por sus siglas en inglés), es utilizadas para conocer el esfuerzo máximo admisible antes producirse una grieta o falla en los asfaltos espumados. Dichas pruebas también se realizan para determinar el daño potencial que pudiera suscitarse ante la presencia de humedad en campo.

El ensayo de Resistencia a la Tensión indirecta se calcula de la siguiente forma

$$RTI = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 1'000,000 \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

RTI = Resistencia a la Tensión Indirecta.	[KPa]
P = Carga máxima aplicada	[KN]
h = Altura promedio del espécimen	[mm]
d = Diámetro del espécimen	[mm]

Se realizan entonces los ensayos de RTI_{SECO} e RTI_{SATURADO}, para posteriormente obtener el valor (TSR) Tensile Strength Ratio por sus siglas en inglés. La cual es la relación entre el promedio de los valores de RTI_{SATURADO} dividido entre los valores de RTI_{SECO} para un grupo específico de especímenes, expresado en porcentaje mediante la Ecuación .

$$TSR = \frac{\text{Prom } RTI_{SATURADO}}{\text{Prom } RTI_{SECO}} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Prom ITS_{SATURADO} = Valores ITS Saturados Promedio [KPa]

Prom ITS_{SECO} = Valores ITS Secos Promedio [KPa]

Los criterios de aceptación del ensayo de resistencia a la tensión Indirecta y TSR se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 Características Mínimas de aceptación Nivel I

PRUEBA	DIÁMETRO DE ESPÉCIMEN	KPa
RTI _{SECO}	100MM	>225
RTI _{SATURADO}	100MM	>100
TSR	> 60%	

El criterio para determinar la necesidad de filler activo es el siguiente:

NO FILLER - Cuando la mezcla sin filler obtenga un valor TSR>60%.

FILLER – Cuando la mezcla sin filler obtenga un valor TSR<60%. Se utiliza entonces la mezcla con filler que logre un $\Delta > 5\%$ respecto a la otra mezcla. En caso de que la diferencia de ambos sea <5%, cualquiera de ambos filler propuestos es el adecuado.

3.3 NIVEL II DETERMINAR EL CONTENIDO DE ASFALTO ESPUMADO

El contenido de asfalto espumado que se determine será producto del diseño de la mezcla, siendo responsabilidad del contratista su determinación, previa revisión y validación de la Supervisión de Obra.

3.3.1 Especímenes de ensayo

Una vez seleccionado el Filler activo que brinda el con mejor desempeño en la mezcla, se procede a optimizar el contenido óptimo de asfalto espumado, partiendo del contenido de asfalto espumado inicial (Nivel I) se ajusta valores por encima y por debajo del punto analizado, regularmente en incrementos de 0.2% de asfalto espumado con relación a su peso volumétrico seco.

El ensayo a realizar en el Nivel II, es similar al ensayo de la prueba en el Nivel I, debido a que se requiere conocer el esfuerzo máximo admisible antes producirse una grieta o falla en los asfaltos espumados, siendo que en éste Nivel II se ajusta la contenido de Asfalto Espumado añadido.

Para esta determinación se elaboran especímenes de 150 mm de diámetro y 95 mm de altura, los cuales son sometidos a los ensayos de RTI con el propósito de conocer el valor TSR. Para ello se requieren elaborar 6 especímenes para cada contenido de asfalto espumado a analizar, siendo 3 de ellos para condición seca y 3 para condición húmeda.

3.3.2 Procedimiento de acondicionamiento.

El procedimiento de curado para especímenes de Nivel II tiene como objetivo simular las condiciones de campo, donde el "Contenido de Humedad de Equilibrio", el cual es

aproximadamente el 50% del Contenido de Humedad Óptimo, a éste proceso de deshidratación controlado se le denomina $RTI_{EQUILIBRIO}$. Para el cuarto acondicionamiento de humedad, se realiza el proceso de $RTI_{EQUILIBRIO}$ y posteriormente se sumerge en agua durante 24 hrs a 25°C, dicho proceso tiene el nombre de $RTI_{EQUI-SATURADO}$. Para fines de terminología y proceso de curado más detallado se anexa la Tabla 8.

Tabla 8 Procedimiento de acondicionamiento para Nivel II.

TERMINOLOGÍA	DIAMETRO ESPÉCIMEN	REGIMEN DE CURADO	CONTENIDO DE HUMEDAD	DISEÑO
$RTI_{EQUILIBRIO}$	150 mm	24 hrs no selladas (40°C) + 48 hrs en bolsa sellada (40°C)	± 50% del Contenido de Humedad Óptima	Nivel II
$RTI_{EQUI-SATURADO}$		EQUIL +24 hrs sumergidas (25°C)	Semi-Saturadas	

Los parámetros mínimos existentes para poder aceptar o rechazar el Diseño Nivel II, son los valores que se muestran a continuación en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 9 Características mínimas de aceptación Nivel II

PRUEBA	DIÁMETRO DE ESPÉCIMEN	KPa
$RTI_{Equilibrio}$	150MM	>175
$RTI_{EQUI-SATURADO}$	150MM	>100
TSR	> 60%	

La cantidad de asfalto espumado que cumpla con los valores mínimos valores de ITS será seleccionada como el indicador primario para la cantidad de asfalto espumado mínima que se deberá agregar a la mezcla. Entonces quedara a criterio del diseñador determinar la cantidad de asfalto espumado que necesita ser agregado a la mezcla para lograr confianza suficiente en el diseño, basado en la variabilidad de los resultados. (La "bondad de ajuste" de la curva de regresión o línea a través de los resultados de la prueba graficada).

3.4 NIVEL III DETERMINAR PROPIEDADES MECÁNICAS

3.4.1 Ensayo Triaxial Simple

El ensayo triaxial simple se lleva a cabo para determinar las propiedades de cohesión y ángulo de fricción interna de materiales estabilizados con asfalto espumado (BSM), con el

fin de utilizar estos parámetros cuando se requiera realizar un diseño de pavimento con un método mecanicista.

3.4.2 Compactación del espécimen triaxial

La compactación se aplica utilizando un esfuerzo de compactación AASHTO modificado (AASHTO T180) en 9 capas, cada una de aproximadamente con 33 mm de espesor, se compactan con 55 golpes con un martillo de 4.536kg con una caída de 457 mm. Posteriormente se enrasa cuidadosamente cualquier exceso de material de la muestra de acuerdo con el procedimiento estándar descrito en el método de prueba.

3.4.3 Curado del espécimen

Al igual que en el Nivel II, el procedimiento de curado para especímenes tiene como objetivo alcanzar el "Contenido de Humedad de Equilibrio" (50% de Humedad Óptima de la mezcla para simular condiciones de campo).

Colocar los especímenes de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura en un horno de a una temperatura de 40° C durante 24 horas.

Retirar los especímenes del horno, colocar cada uno en una bolsa de plástico sellada (al menos dos veces el volumen de la muestra) y colocarlo de nuevo en el horno a 40°C durante otras 48 horas.

Retirar las muestras del horno después de 48 horas y sacar de sus respectivas bolsas de plástico, asegurando que cualquier humedad en las bolsas no entra en contacto con la muestra. Dejar que se enfríen a 25 ° C ($\pm 2,0$ ° C) para su posterior ensayo.

3.4.4 Procedimiento de evaluación

Se requieren elaborar la menos 8 especímenes para esta prueba triaxial por cada diseño de Nivel II alcanzado, éstos son especímenes de 150mm de Diámetro, y 300mm de Altura. La condición de humedad de las pruebas triaxiales, se realizan basados en el proceso de acondicionamiento, es decir, son ensayadas al 50% de la humedad óptima de la mezcla, dicha humedad es posible alcanzarse alrededor de las 48-72hrs. Cada una de los especímenes son ensayados con su respectiva replica a diferentes presiones de confinamiento (0, 50, 100, 200 KPa) y a una velocidad constante de 0.3 mm/s, para poder así determinar mediante círculos de Mohr-Coulomb los parámetros de cohesión y fricción.

Los valores mínimos requeridos para la clasificación de los Materiales Estabilizados con Asfalto espumado se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10 Parámetros mínimos de diseño Nivel III

Parámetro	Requerimiento
Cohesión (KPA) [kg/cm ²]	>250 [2.55]
Ángulo De Fricción (°)	>40°

4.- CONSTRUCCION

En lo relativo a la construcción de una capa con calidad de base estabilizada con asfalto espumado se deberán seguir los siguientes lineamientos:

La elaboración de la mezcla espumosa deberá realizarse en una recicladora en frío Wirtgen WR 4200 donde serán tratados los materiales recuperados y/o de aporte, cumpliéndose un control de calidad propuesto en el anexo 1, el cual se muestra el final del presente documento.

a) Paso 1 Fresado de carpeta existente:

Mediante el uso de una maquina fresadora de pavimentos se retiran las capas del pavimento que no van a formar parte de la estabilización, de acuerdo a lo especificado en cada proyecto, la maquina fresadora debe contar con un sistema de nivelación con sensores que asegure las profundidades de corte señaladas. Para el fresado de los materiales del pavimento se utilizara una fresadora de pavimento con control de revoluciones en el tambor de fresado, tipo Wirtgen o técnicamente equivalente. La profundidad del fresado dependerá del resultado obtenido del diseño de la base estabilizada con asfalto espumado en laboratorio.

b) Paso 2 Estabilización de la base con asfalto espumado

1) Para la estabilización de la base espumada se utilizará una recicladora en frío Wirtgen WR 4200, la cual debe tener la capacidad de reciclar capas de pavimento de gran espesor en una pasada, debe ser autopropulsada y disponer de tambores de fresado de accionamiento hidráulico, una mezcladora de circulación forzada de dos árboles, una instalación de ligante de mando electrónico y una unidad de tendido de alta potencia.

2) La estabilización de la base con asfalto espumado se realizará en 5 procesos que realizará el equipo WR 4200, los cuales se describen a continuación:

a. Fresado.

- Una profundidad de fresado de 0 a 20 cm, con una velocidad de operación de 0 a 16 m/min. La unidad de fresado debe de disponer de tres tambores accionados hidráulicamente.
- La anchura de trabajo de los tambores delanteros de puede ajustar de manera continua en la gama de 2.8 a 4.2m, este ajuste debe poder realizarse mientras

la máquina se encuentra trabajando. Lo cual permita el rehabilitado de la capa de base en una sola pasada sin una junta longitudinal.

- Debe contar con una unidad de rociado con agua acondicionada de forma hidráulica y ubicada en la unidad de fresado con el objetivo de evitar nubes de polvo, refrigerar las picas del vástago cilíndrico.
 - Deberá contar con una barra quebrantadora para el tambor trasero, con el objetivo de evitar el desprendimiento de trozos grandes de asfalto y controlar el tamaño máximo del material fresado.
- b. Inyección de agua.
- Instalación de sistema de inyección de agua. La cantidad de agua agregada a la mezcla deberá ser la necesaria para llegar al 65-80 % del contenido óptimo de humedad de la prueba AASHTO Modificado (T-180), con el objetivo de alcanzar el nivel húmedo óptimo de material a reciclar, la cual se suministrará a través de una instalación adicional con tobera por separado. Deberá contar con una bomba excéntrica para absorber el agua directamente del camión cisterna o del depósito de agua de la máquina. La capacidad máxima de transporte de la bomba helicoidal excéntrica será de 400 l/min.
 - En combinación con la WR4200 se tendrá el equipo Wirtgen WM 1000 para inyectar una suspensión de cemento en agua a través de una tobera de la instalación de agua.
- c. Inyección de asfalto espumado
- El sistema de inyección de asfalto espumado deberá asegurar la expansión volumétrica y vida media del asfalto mediante la inyección de agua, aire y asfalto a una cámara de expansión de asfalto espumado con los parámetros definidos por el laboratorio para la fuente de asfalto
 - El proceso de espumado tendrá lugar en las cámaras de expansión de la barra de inyección. La capacidad máxima de transporte de la bomba de engranajes para asfalto, calentada de forma eléctrica, será de 500 kg/min. Contará con 8 toberas de barra de inyección de asfalto caliente las cuales se abrirán y cerrarán automáticamente mediante cilindros neumáticos.
 - Deberá contar con un sistema de control en tiempo real que garantice de forma automatizada la dosificación de todos los elementos de la mezcla en los porcentajes establecidos por el proyecto
- d. Mezclado
- Se deberán mezclar los materiales en las proporciones definidas por el diseño particular de mezcla del proyecto. El mezclado se realizará en un conducto-gemelo mezclador continuo que se encuentra en el equipo. El cual cuenta con una cámara de doble flecha con circulación forzada para asegurar la

homogenización de los agregados y aglutinantes de la mezcla, con una capacidad de 400 Toneladas/horas y debe alcanzar una calidad de mezclado similar a las plantas de mezclado convencional fijas.

e. Tendido y compactación

- La regla de tendido será tipo Vögele AB500 TV con una regulación máxima de perfil del techo de 4%. La cual debe ser provista de una apisonadora y un dispositivo de vibración. Las anchuras se deberán ajustar en la gama de 3 a 5 m de forma continua e hidráulica. La regla de pavimentación colocará el material reciclado de acuerdo al perfil requerido y proporcionará una precompactación mediante tãmperes.

c) Paso 3 Compactación

- 1) La compactación primaria se realizara seguidamente del extendido se compactara utilizando un compactador de por lo menos 12 toneladas de peso con compactación dinámica en amplitud alta y frecuencia baja.
- 2) Compactación secundaria. Se deberá realizar utilizando un compactador de rodillo liso con amplitud baja y frecuencia alta.
- 3) Compactación neumática. Para efectos de protección se rociara agua en la corona de la base y se hará circular un compactador neumático hasta cerrar los poros en la superficie. El número de pasadas será definido por el laboratorio.
- 4) Tiempo para la colocación de la carpeta. Se deberá esperar hasta que el material extendido llegue al (50) % de su contenido optimo de humedad, antes de extender la carpeta asfáltica.

MEDICIÓN: Para base espumada con asfalto se tomará como unidad de medida el metro cúbico (m3); para fines de pago se cuantificarán las unidades realmente ejecutadas en obra y ordenadas por el Organismo considerando los volúmenes resultantes del espesor total excavados y secciones transversales, aproximando la cantidad con dos decimales.

BASE DE PAGO: El bacheo profundo aislado se pagará al precio unitario fijado, por precio por unidad de obra terminada (P.U.O.T), en el contrato para el metro cúbico (m3) compacto e incluye lo que corresponda por: excavación, rampas de acceso para introducir los equipos; la limpieza parcial y/o total del área de trabajo que sean necesarios, carga y desperdicio de los materiales sobrantes producto de excavación con acarreo hasta el banco de tiro; conformación del material existente en el almacén de desperdicio, conformación y acomodo del material extraído producto de esta actividad en el almacén de desperdicio; compactación de la superficie descubierta al grado fijado; cargas, acarreos, suministro, adquisición y acomodo del material de la capa drenante, suministro, adquisición y compactación del material de subbase hidráulica, suministro, adquisición y compactación del material de base estabilizada con asfalto espumado, suministro,

adquisición y compactación del material de carpeta asfáltica, suministro y adquisición de las emulsiones asfálticas y cemento asfáltico AC-20, agua empleada para compactación, aplicación del riego de liga y riego de impregnación, los tiempos de los vehículos empleados, acarreos, lo que corresponda por señalamiento preventivo de acuerdo al Manual de Dispositivos para el Control de Tránsito en Calles y Carreteras de la S.C.T., y todas las actividades necesarias para la correcta ejecución de los trabajos.

Control de calidad

Los ensayos que se deberán realizar para la ejecución del tramo de prueba, están divididas en tres partes: Ensayos de previos al diseño, ensayos durante la ejecución y control de calidad después de la compactación.

Ensayos previos al diseño.

Estos ensayos tienen la finalidad de aportar las características físicas de la estructura de pavimento existente. Esto es fundamental para el correcto diseño de la rehabilitación del pavimento ya que se está proponiendo un procedimiento de reciclado de base con asfalto espumado en sitio.

Primeramente se deberá realizar un sondeo en el tramo de prueba, del cual se determinarán las siguientes características de cada uno de los estratos.

- Determinación de número de estratos,
- Espesor de cada estrato, determinando su variabilidad a lo largo del tramo,
- Para el caso de la carpeta se deberá obtener una muestra mediante fresado de la misma, a este material fresado se le determinará la granulometría.
- De las otras capas se determinará la granulometría, contenido de humedad, grado de compactación y la Densidad Seca Máxima. Se deberá analizar la variabilidad del material a lo largo del tramo.

Estos resultados servirán para definir el número de secciones homogéneas, y los valores de referencia para el diseño de la base reciclada con asfalto espumado.

Para el caso de la carpeta asfáltica, se realizará la caracterización del material pétreo y la caracterización del ligante asfáltico para determinar que el Grado PG, cumpla con lo estipulado en el proyecto y la normativa vigente.

Ensayos durante la ejecución del tramo.

El equipo que se utilizará para la construcción de la base con material reciclado mediante asfalto espumado es una recicladora en frío WR 4200 de Wirtgen, la cual permite reciclar la carpeta y la base hidráulica, incorporar el contenido agua requerido y elaborar el asfalto espumado.

En esta parte se verificará:

- Elaboración del asfalto espumado (expansión y vida media),
- Granulometría de la base,
- Contenido de humedad,
- Contenido de filler de aporte,
- Ensayos de tensión indirecta en especímenes de campo (Especímen de 95 mm de altura y 150 mm de diámetro).

La muestra será tomada inmediatamente detrás de la recicladora y del espesor total de la capa (antes de ser compactado), para lo cual se anexa el procedimiento de control de calidad campo mostrado a continuación.

Control de calidad (BSM Workshop Kassel) Métodos para muestreos y ensayo de materiales estabilizados con asfalto.

1. Muestras de Campo

Muestras de (± 1000 kg) de material tratado obtenido en sitio:

- Cuando el material es mezclado en sitio, la muestra es tomada inmediatamente detrás de la recicladora y del espesor total del material tratado (antes de ser compactado).
- Cuando el material es mezclado en planta y colocado por una pavimentadora, las muestras deben ser tomadas ya sea en la planta de mezclado o en el sitio siguiendo un procedimiento de muestreo estándar.

Colocar cada muestra en un contenedor hermético o en doble bolsa de plástico para prevenir pérdida de humedad. El contenedor (o bolsa) utilizado para el muestreo deberá ser suficientemente grande para asegurar que el material se mantiene en estado suelto y no se está compactando al interior del contenedor.

Las muestras de campo son transportadas al laboratorio en las primeras dos horas después del muestreo y los especímenes de ensayo deben de ser fabricados en las primeras cuatro horas después del muestreo.

2. Preparación de la muestra

Prepare la muestra pasándola por la malla de 19mm (3/4"). Descartar la fracción retenida en la malla de 19 mm. Colocar la muestra en un contenedor hermético y verificar que el contenedor se mantenga a una temperatura entre 22°C y 25°C. Si la temperatura del material está fuera del rango establecido, se deberá colocar la muestra en un cuarto a temperatura controlada hasta que el material esté en el rango de temperatura establecido.

3. Ajuste del contenido de humedad

Las muestras de campo están generalmente entre 60% y 80% del Contenido Óptimo de Humedad (COH), se deberá agregar el agua suficiente a la muestra para lograr el COH antes de realizar el proceso de compactación. Debido a la variabilidad del material reciclado, el COH exacto no puede ser conocido de manera precisa, por lo cual se deberá realizar un estudio previo para determinar la variabilidad del material reciclado.

3.1. Cuando la Densidad Seca Máxima (DSM) y el Contenido Óptimo de Humedad (COH) del material son conocidos con cierta certeza:

- Estimar el contenido de humedad de campo
- Ajustar el contenido de humedad de 20 kg de material para obtener el COH, mezclar a fondo y colocar en un contenedor hermético.
- Proceder de acuerdo a la sección 4 y fabricar seis probetas de 152 mm de diámetro para ensayo.

4. Elaboración de especímenes de ensayo

Determinar la masa requerida para lograr un espécimen de 95 mm de altura y 150 mm de diámetro. Utilizando la masa obtenida se elaborarán seis especímenes.

En relación a la carpeta asfáltica se revisará lo siguiente:

- Calidad de los materiales (agregado y asfalto)
- Contenido de asfalto,
- Granulometría,
- Temperatura de mezclado y compactación.

Ensayos después de la compactación.

En el caso de la base reciclada con asfalto espumado se realizarán los siguientes ensayos después de la compactación:

- Granulometría,
- Grado de compactación

Para el caso de la carpeta asfáltica se extraerán núcleos para realizar los siguientes ensayos:

- Grado de compactación,
- Granulometría,
- Contenido de asfalto de la mezcla de campo,
- Susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica.
- Susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla asfáltica (Rueda de Hamburgo).