



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PROFESIONAL

**“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN
FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE
MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

EMMANUEL SALINAS RANGEL

ASESOR:

M.I.T. MARCO ANTONIO MONDRAGON ORNELAS

Morelia, Michoacán, julio del 2019.



ÍNDICE

ÍNDICE	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE GRÁFICAS	ix
DEDICATORIAS	x
AGRADECIMIENTOS	xii
I.- RESUMEN	xiv
II.- ABSTRACT	xiv
III.- JUSTIFICACIÓN	xv
IV.- HIPOTESIS	xv
V.- OBJETIVOS	xvi
VI.- OBJETIVO GENERAL	xvi
VII.- OBJETIVOS PARTICULARES	xvi
1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- ESTADO DEL ARTE	3
2.1.- GENERALIDADES DEL ASFALTO	3
2.2.- DEFINICIÓN “EMULSIÓN”	3
2.2.1.- Clasificación de acuerdo al tamaño de partículas	4
2.2.2.- Clasificación de acuerdo a la concentración de la fase dispersa ..	5
2.2.3.- Clasificación de acuerdo al emulsificante	5
2.3.- HISTORIA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS	6
2.4.- COMPOSICIÓN DE LAS EMULSIONES	7
2.5.- CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS	8
2.6.- ELABORACION DE LA EMULSIÓN	10
2.6.1.- Proceso de Emulsificación	11
3.- CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	13
3.1.- DEFINICIÓN:	13
3.2.- MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	13
3.2.1.- Mezcla asfáltica de granulometría densa	15
3.2.2.- Mezcla asfáltica de granulometría abierta	15
3.2.3.- Mezcla asfáltica de granulometría discontinua, tipo SMA	16
3.3.- MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO	17



3.3.1.- Mezcla asfáltica de granulometría densa	17
3.3.2.- Mortero asfáltico	18
3.4.- MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS O TEMPLADAS	19
4.- ESTUDIO DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA	20
4.1.- PRUEBAS EN EMULSIONES ASFÁLTICAS	20
4.1.1.- Destilación de Emulsiones Asfálticas	20
4.1.2.- Retenido en las Mallas N°20 Y N°60 en Emulsiones Asfálticas	23
4.1.3.- Viscosidad Saybolt- Furol	26
4.1.4.- Carga Eléctrica de las Partículas de Emulsiones Asfálticas	30
4.2.- PRUEBAS A MATERIALES PÉTREOS:	33
4.2.1.- Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	34
4.2.2.- Densidades Relativas y Absorción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	41
4.2.3.- Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	48
4.2.4.- Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas	52
5.- DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	59
5.1.- DISEÑO DE MEZCLA PARA ESPECÍMENES	59
5.1.1.- Cálculo del Contenido Mínimo de Asfalto para Especímenes	66
5.1.2.- Cálculo del Contenido Mínimo de Asfalto por el Método Analítico para Especímenes	70
5.1.3.- Cálculo de Diseño de Especímenes de Prueba con el Contenido Mínimo para Especímenes	71
5.2.- DISEÑO DE MEZCLA PARA PASTILLAS	72
5.2.1.- Cálculo del Contenido Mínimo de Asfalto para Pastillas	75
5.2.2.- Cálculo del Contenido Mínimo de Asfalto por el Método Analítico para Pastillas	79
5.2.3.- Cálculo de Diseño de Especímenes de Prueba con el Contenido Mínimo para Pastillas	80
6.- EXPERIMENTACIÓN:	82
6.1.- ELABORACIÓN DE CILINDROS	82
6.1.1.- Objetivo:	82
6.1.2.- Equipo Para la Elaboración de Especímenes	82



6.1.3.- Procedimiento de Elaboración de Especímenes	83
6.2.- ELABORACIÓN DE PASTILLAS	89
6.2.1.- Objetivo:	89
6.2.2.- Equipo Para la Elaboración de las Pastillas:.....	89
6.2.3.- Procedimiento de Elaboración de Pastillas.....	90
7.- RESULTADOS	96
7.1.- RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA	96
7.1.1.- Producto asfáltico (emulsión).....	96
7.1.2.- Materiales pétreos	97
7.2.- RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN DE LOS CILINDROS	99
7.3.- RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN DE LAS PASTILLAS	102
8.- CONCLUSIÓN.....	104
9.- BIBLIOGRAFÍA	106



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.- TAMAÑOS RELATIVOS Y DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE ASFALTO EN UNA EMULSIÓN (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)	12
FIGURA 2.- DESCRIPCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA (Olvera, 2013).....	13
FIGURA 3.- ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (BARDASANO G., 2015) [10/07/2019]	14
FIGURA 4.- ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (GUTIÉRREZ, 2018) [10/07/2019]	14
FIGURA 5.- DEFORMACIONES EN CAPAZ DE PAVIMENTO (PADILLA R., 2014) [10/07/2019].....	14
FIGURA 6. - PLANTA ASFÁLTICA EN FRÍO (QUIMIASFALT,2019) [10/07/2019]	17
FIGURA 7.- MORTERO ASFÁLTICO (GOOGLE, 10/07/2019).....	18
FIGURA 8.- MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA (GOOGLE,10/07/2019)	19
FIGURA 9.- PESO MUESTRA DE DESTILACIÓN (FOTO E. SALINAS R. 2019)	21
FIGURA 10.- PROCESO DESTILACIÓN (FOTO E. SALINAS R., 2019)	22
FIGURA 11.- PESO CHAROLA MÁS MALLA RET #20 (FOTO E. SALINAS R., 2019)	24
FIGURA 12.- PASO DE EMULSIÓN POR LA MALLA #20 (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	25
FIGURA 13.- EMULSIÓN A 50 °C (FOTO E. SALINAS R., 2019)	29
FIGURA 14.- COLOCACIÓN DE EMULSIÓN EN VISCOSÍMETRO (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	29
FIGURA 15.- LLENADO DE MATRAZ CON EMULSIÓN (FOTO E. SALINAS R., 2019)	30
FIGURA 16.- PRUEBA CARGA ELÉCTRICA DE PARTÍCULAS (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	31
FIGURA 17.- DETERMINACIÓN DE CARGA ELÉCTRICA DE PARTÍCULAS (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	32
FIGURA 18. - MACROLOCALIZACIÓN DEL BANCO DE MATERIALES “CERRITOS” (GOOGLE EARTH, 2019).....	33
FIGURA 19. - MICROLOCALIZACIÓN DEL BANCO DE MATERIALES “CERRITOS” (GOOGLE EARTH, 2019).....	33
FIGURA 20.- CUARTEO DE MUESTRA (FOTO E. SALINAS R., 2019)	37
FIGURA 21.- COLOCACIÓN DE MUESTRA Y ESFERAS DENTRO DE LA MÁQUINA DE DESGASTE (E. SALINAS R., 2019).....	51
FIGURA 22.- BOTELLA CON SIFÓN (M-MMP-4-04-004-02, 2002).....	53
FIGURA 23.- NIVELES DE FINOS (FOTO E. SALINAS R., 2019)	57
FIGURA 24.- MEDICIÓN DEL NIVEL DE ARENA (M-MMP-4-04-004-02, 2002)	57



FIGURA 25.- MEDICIÓN DE NIVELES DE ARENA Y FINOS (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	58
FIGURA 26.- PREPARACIÓN DE BOLSAS CON CANTIDADES DE MATERIAL NECESARIAS PARA ESPECÍMENES (FOTO E. SALINAS R., 2019)	65
FIGURA 27.- ELABORACIÓN DE BOLSAS CON CANTIDAD NECESARIA PARA PASTILLAS (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	74
FIGURA 28.- MOJADO DE MATERIALES PARA ESPECÍMENES (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	83
FIGURA 29.- MEZCLADO DE MATERIALES Y EMULSIÓN (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	84
FIGURA 30.- EXPOSICIÓN DE MEZCLAS AL SOL PARA ELIMINACIÓN DE AGUA (FOTO E. SALINAS R., 2019)	84
FIGURA 31.- MEZCLA HÚMEDA (FOTO E. SALINAS R., 2019)	85
FIGURA 32.- MEZCLA SECA (FOTO E. SALINAS R., 2019)	85
FIGURA 33.- LLENADO DE CILINDRO (FOTO E. SALINAS R., 2019)	86
FIGURA 34.- CILINDRO PREPARADO PARA SER COMPACTADO (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	86
FIGURA 35.- COMPACTADO DE MEZCLA (FOTO E. SALINAS R., 2019)....	87
FIGURA 36.- EXTRACCIÓN DE ESPECÍMEN (FOTO E. SALINAS R., 2019)	87
FIGURA 37.- ESPECÍMEN EXPUESTO AL AMBIENTE POR 24 HORAS (FOTO E. SALINAS R., 2019)	88
FIGURA 38.- MEDICIÓN DE ESPECÍMEN (FOTO E. SALINAS R., 2019)	88
FIGURA 39.- APLICACIÓN DE CARGA A ESPECÍMEN (FOTO E. SALINAS R., 2019)	89
FIGURA 40.- FALLA DE ESPECÍMEN (FOTO E. SALINAS R., 2019)	89
FIGURA 41.- APLICACIÓN DE AGUA A MATERIALES (FOTO E. SALINAS R., 2019)	91
FIGURA 42.- PESADO DE CANTIDAD NECESARIA DE EMULSIÓN (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	91
FIGURA 43.- MEZCLADO DE MATERIALES Y EMULSIÓN (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	92
FIGURA 44.- ASOLEADO DE MEZCLA (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	92
FIGURA 45.- MEZCLA HÚMEDA (FOTO E. SALINAS R., 2019)	93
FIGURA 46.- ROMPIMIENTO DE LA MEZCLA (FOTO E. SALINAS R., 2019)	93
FIGURA 47.- COLOCADO DE ACEITE EN EL MOLDE (FOTO E. SALINAS R., 2019)	94
FIGURA 48.- COMPACTACIÓN DE MEZCLA (FOTO E. SALINAS R., 2019)	94
FIGURA 49. - SECADO DE PASTILLA EN HORNO A 60 °C (FOTO E. SALINAS R., 2019).....	95
FIGURA 50.- DESMOLDE DE PASTILLAS.....	95
FIGURA 51.- PRUEBA DE PASTILLA (FOTO E. SALINAS R., 2019)	95



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.- CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS (SCT, 2006)	8
TABLA 2.- GRADOS DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)	10
TABLA 3.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa (N-CMT-4-04-17, 2017)	15
TABLA 4.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA ABIERTA (N-CMT-4-04-17, 2017).....	16
TABLA 5.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DISCONTINUA, TIPO SMA (N-CMT-4-04-17, 2017) ...	17
TABLA 6.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa (IMT, 2017).....	18
TABLA 7.- JUEGOS DE MALLAS PARA GRAVA (M-MMP-4-04-002-02, 2002).....	34
TABLA 8.- JUEGOS DE MALLAS PARA ARENA CON FINOS (M-MMP-4-04-002-02, 2002)	35
TABLA 9.- GRANULOMETRÍA GRAVA (E. SALINAS R., 2019)	40
TABLA 10.- GRANULOMETRÍA SELLO (E. SALINAS R., 2019).....	41
Tabla 11.- GRANULOMETRÍA ARENA	41
TABLA 12.- JUEGO DE MALLAS (M-MMP-4-04-006-02, 2002)	49
TABLA 13.- COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA DE PRUEBA Y CARGAS ABRASIVAS (M-MMP-4-04-006-02, 2002).....	51
TABLA 14.- TANTEO1 (E. SALINAS R., 2019).....	59
TABLA 15.- % QUE PASA DE TANTEO 1 (E. SALINAS R., 2019)	60
TABLA 16.- TANTEO 2 (E. SALINAS R., 2019).....	61
TABLA 17.- % QUE PASA DE TANTEO 2 (E. SALINAS R., 2019).....	61
TABLA 18.- TANTEO 3 (E. SALINAS R., 2019).....	62
TABLA 19.- % QUE PASA DE TANTEO 3 (E. SALINAS R., 2019).....	62
TABLA 20.- TANTEO 4 (E. SALINAS R., 2019).....	63
TABLA 21.- % QUE PASA DE TANTEO 4 (E. SALINAS R., 2019).....	64
TABLA 22.- CANTIDADES DE MATERIAL POR ESPECÍMEN (E. SALINAS R., 2019).....	65
TABLA 23.- GRANULOMETRÍA ÓPTIMA (E. SALINAS R., 2019).....	66
TABLA 24.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)	66
TABLA 25.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (E. SALINAS R., 2019)	67
TABLA 26.- CONSTANTES DE ÁREA PARA CADA FRACCIÓN DE TAMAÑOS (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)	67
TABLA 27.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (E. SALINAS R., 2019)	67
TABLA 28.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (E. SALINAS R., 2019)	68
TABLA 29.- ÍNDICE ASFÁLTICO DE ACUERDO A ORIGEN Y ABSORCIÓN DEL MATERIAL PÉTREO (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)	68
TABLA 30.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (E. SALINAS R., 2019)	69
TABLA 31.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (E. SALINAS R., 2019)	69
TABLA 32.- GRANULOMETRÍA ÓPTIMA (E. SALINAS R., 2019).....	70



TABLA 33.- COEFICIENTE ASFÁLTICO SEGÚN CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)	71
TABLA 34.- CANTIDAD DE EMULSIÓN POR PORCENTAJE A UTILIZAR (E. SALINAS R., 2019)	72
TABLA 35.- GRANULOMETRÍA ÓPTIMA (E. SALINAS R., 2019).....	73
TABLA 36.- CANTIDADES DE MATERIAL POR PASTILLA (E. SALINAS R., 2019)	74
TABLA 37.- GRANULOMETRÍA OPTIMA (E. SALINAS R., 2019).....	75
TABLA 38.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)	75
TABLA 39.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO (E. SALINAS R., 2019).....	76
TABLA 40.- CONSTANTES DE ÁREA PARA CADA FRACCIÓN DE TAMAÑOS (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)	76
TABLA 41.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO (E. SALINAS R., 2019).....	76
TABLA 42.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO (E. SALINAS R., 2019).....	77
TABLA 43.- ÍNDICE ASFÁLTICO DE ACUERDO A ORIGEN Y ABSORCIÓN DEL MATERIAL PÉTREO (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)	77
TABLA 44.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO (E. SALINAS R., 2019).....	78
TABLA 45.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO (E. SALINAS R., 2019).....	78
TABLA 46.- GRANULOMETRÍA ÓPTIMA (E. SALINAS R., 2019).....	79
TABLA 47.- COEFICIENTE ASFÁLTICO SEGÚN CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL (D) (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)	80
TABLA 48.- CÁLCULO DE CANTIDAD NECESARIA POR PORCENTAJE DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (E. SALINAS R., 2019).....	81
TABLA 49.- RESULTADOS DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (E. SALINAS R., 2019)	96
TABLA 50 REQUISITOS DE CALIDAD PARA EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIONICAS (N-CMT-4-05-001/06, 2006).....	96
TABLA 51.- RESULTADOS DE MATERIALES PÉTREOS (E. SALINAS R., 2019)	97
TABLA 52.- REQUISITOS DE CALIDAD DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa CUANDO $\square L \square 106$ (IMT, 2017)	97
TABLA 53.- GRANULOMETRÍA OPTIMA (E. SALINAS R., 2019).....	98
TABLA 54.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa (N-CMT-4-04-17, 2017)	99
TABLA 55.- RESULTADOS DE ESPECÍMENES CON T.M. $\frac{3}{4}$ ” (E. SALINAS R., 2019)	100
TABLA 56.- RESULTADOS DE ESPECÍMENES CON T.M. $\frac{1}{2}$ ” (E. SALINAS R., 2019)	101
TABLA 57.- RESULTADOS DE PASTILLAS (E. SALINAS R., 2019)	102
TABLA 58 TABLA LV.- REQUISITOS DE CALIDAD PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa, DISEÑADAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL (N-CMT-4-05-003-16, 2016).....	104



ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRAFICA 1.- GRAFICA % TANTEO 1 VS. LIMITES (E. SALINAS R., 2019).....	60
GRAFICA 2.- % QUE PASA TANTEO 2 VS. LIMITES (E. SALINAS R., 2019)	61
GRAFICA 3.- % QUE PASA DE TANTEO 3 VS. LIMITES (E. SALINAS R., 2019)	63
GRAFICA 4.- % QUE PASA DE TANTEO 4 VS. LIMITES (E. SALINAS R., 2019)	64
GRAFICA 5. - RESULTADOS DE ESTABILIDAD DE ESPECÍMENES CON T.M. $\frac{3}{4}$ " (E. SALINAS R., 2019).....	100
GRAFICA 6.- RESULTADOS DE ESTABILIDAD PARA ESPECÍMENES CON T.M. $\frac{1}{2}$ " (E. SALINAS R., 2019)	101
GRAFICA 7.- ESTABILIDAD EN PASTILLAS (E. SALINAS R., 2019).....	102
GRAFICA 8.- GRAFICA DE FLUJO DE PASTILLAS (E. SALINAS R., 2019).....	103



DEDICATORIAS

A mi papá: **CORNELIO SALINAS ROMERO**, por ser siempre un pilar en la casa, siempre guiarnos por el camino del bien a mi hermano y a mí, por ser un ejemplo de padre y saber aconsejarnos cuando no sabemos qué hacer en momentos difíciles y a no doblegarnos, por motivarme a seguir mis sueños y cumplir mis metas ya que en ocasiones llegué a pensar en renunciar, en desistir a mis estudios, más sin embargo lograste motivarme y darme esos buenos consejos que me alentaban y me daban fuerzas para seguir adelante, gracias a eso el día de hoy podemos disfrutar de este logro que no solo es mío, es tuyo también. Muchas gracias por ser mi padre, por estar en mi vida y por ayudarme a cumplir mis metas.

A mi mamá: **MIREYA RANGEL OROZCO**, por ayudarme a tener carácter y poder enfrentar todos mis temores para con ello lograr alcanzar mis sueños, por reconfortarme y darme consejos cuando en ocasiones no tenía idea que poder hacer cuando una situación se tornaba difícil, por alentarme de igual manera que mi papá en esos momentos en que pensaba renunciar a mis estudios, por guiarnos a mi hermano y a mí por el camino del bien y por todas esas ocasiones que aun sintiéndote mal, hacías el sacrificio de ayudarnos en lo que podías para que nosotros no nos desconcentráramos de nuestros estudios y nos ayudabas en lo que podías de nuestras tareas escolares, por todo eso y más este logro también es tuyo, muchas gracias por ser mi madre, por estar en mi vida y ayudarme a cumplir mis metas.

Muchas gracias por ser mis padres, que a pesar de tener momentos muy difíciles en la familia, de mucha tensión, siempre han sabido resolverlos e inculcarnos el valor de responsabilidad, que aunque las cosas se tornen difíciles, no serán para siempre y que eso solo es una prueba para demostrar que tan fuerte es uno como persona y en conjunto como familia, siempre serán muy valiosos en mi vida y se perfectamente que siempre podré contar con ustedes cuando los necesite, gracias por sus consejos, sus enseñanzas y las alegrías que juntos hemos vivido. Son pocas palabras para demostrar todo lo que estoy agradecido con ustedes.

A mi hermano: **OMAR SALINAS RANGEL** por apoyarme siempre que lo necesite, por estar siempre conmigo a pesar de los disgustos que teníamos, me enseñaste a no ser rencoroso y a saber que vale más la familia que cualquier otra cosa en la vida, por demostrarme que, si algo se quiere, se lucha hasta conseguirlo y por mantenerlo, ya sean sueños o pertenencias materiales. Gracias por ser mi hermano y apoyarme en todo lo que has podido, a pesar de que te ha tocado vivir experiencias muy malas, gracias por eso y mucho más.



A mis abuelos **ANTONIO SALINAS GONZÁLEZ Y ANTONIA ROMERO VARGAS**, por apoyarme incondicionalmente, por darme siempre muy buenos consejos y siempre dar un buen ejemplo, por demostrarme que siempre se puede lograr las metas si uno se lo propone y trabaja duro para conseguirlo, por ser un ejemplo de cómo hacer las cosas y que a pesar de que han vivido situaciones muy difíciles, siempre tengan una sonrisa en la cara y nos demuestren que no hay situación que no se resuelva, hay mucho que agradecerles, gracias por permitirme lograr mis sueños y siempre aconsejarme de la mejor manera, por eso y más razones este logro también es de ustedes, hoy compartimos este triunfo que merecido lo tenemos todos.

A mis abuelos **MANUEL RANGEL RINCÓN Y MARTHA IMELDA OROZCO CABALLERO**, por aconsejarme y apoyarme cuando lo necesite, por todos los momentos que vivimos, por demostrarme que necesitamos ser fuertes a pesar de los problemas que surjan y seguir adelante, que siempre hay que tener la frente en alto y que necesitamos demostrar de lo que uno es capaz de lograr, por todo eso y más muchas gracias, este triunfo también es de ustedes.

A mi toda mi familia en general, por apoyarme en todo lo que necesite, por siempre estar al pendiente por si algo me hacía falta y por alentarme a seguir mis metas, a cumplir cada uno de los propósitos que me ponga. ¡MUCHAS GRACIAS A TODOS Y CADA UNO DE LOS QUE HICIERON POSIBLE QUE HOY LOGRE CUMPLIR ESTA META!

“Piensa, Cree, Sueña Y Atrévete”. Autor Anónimo

“Cambiar el mundo es el resultado de la suma de todos nuestros pequeños pasos”. Autor Anónimo



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme concluir esta tarea, por darme fuerzas y sabiduría para realizar esta tesis y mantener mi perseverancia y ánimos para no desistir. Por darme alientos y fuerzas cuando ya no podía más.

Agradezco a mis padres por su apoyo tan grande en cada etapa de mi vida y logros que he conseguido, por sus consejos, por creer en mí a pesar que en ocasiones los decepcionaba por mis actos y ser aliento para lograr mis objetivos. Por alentarme en momentos difíciles y comprenderme cuando se me tornaban las cosas de mala manera, por enseñarme el valor de la responsabilidad y enseñarme a no rendirme a pesar de lo difícil que se torne la situación.

A mi hermano, que me ha enseñado grandes cosas que le ha tocado aprender de la manera difícil, por enseñarme a seguir adelante y luchar por cada uno de mis sueños sin importar que tan grandes o difíciles sean de conseguir.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de conseguir uno de mis sueños, por ser la institución que me formó profesionalmente. A la Facultad de Ingeniería Civil, que siempre llevaré en mi corazón y a la cual recordaré con mucho cariño. Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, a la Sección de Materiales Asfálticos y todo su personal por brindarme las instalaciones, material y equipo necesarios para el desarrollo de la investigación. A mis profesores, por sus enseñanzas y consejos.

A mi asesor, el M.I.T. Marco Antonio Mondragón Ornelas, quien fue además de tutor, profesor y gran amigo, por ayudarme en repetidas ocasiones en mis tareas escolares y apoyarme para realizar mi tesis, además de que me aportó mucho conocimiento en el área de asfaltos para realizar la tesis, para poder impartir las prácticas de manera correcta y con información verídica, gracias por creer en mí y brindarme la oportunidad de conseguir empleo dentro del laboratorio de materiales.

Al Dr. Mario Salazar Amaya, quien me brindo su ayuda y consejos en todo momento, aportando de su conocimiento en el área de asfaltos, resolviendo dudas de una manera tan clara.

A los compañeros que me ayudaron a realizar el trabajo de la experimentación, Haiatt Shannit, Aldo Jazziel, José Luis Corona, Eduardo, quienes me ayudaron en la experimentación realizada para poder concluir con la tesis.

A mis compañeros y grandes amigos de la sección 07 y 01, que cada uno apporto gran conocimiento para poder lograr este sueño.

A mis amigos, José Antonio Hurtado Cálix, Ulises Franco Huerta, Francisco Xavier Arroyo Altamirano, Oscar Fernando Peralta Ayala, Carmen Reyes Vargas, Berenice Soto Villegas, Andrea Celeste Melchor Galván, Ricardo Aboyte Rangel, Víctor Manuel Báez Ángel, Juan José Cueto Medina, Micaela Raso Magallán, Marvin Castañeda Ceja,



“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



a todos ellos que no solo fueron compañeros de clase, si no, también grandes amigos que me aportaron grandes conocimientos y pasamos muy buenos momentos.

A todos aquellos quienes me tendieron la mano e hicieron mi trabajo más sencillo

A mis maestros, muchas gracias por transmitirme el conocimiento que ustedes han adquirido en muchos años, por creer en mí y formarme como Ingeniero Civil, es una noble, pero muy significativa labor la que realizan día con día para que los miles de jóvenes que tienen el sueño de ser ingenieros como yo, logremos realizar tan anhelado sueño, muchas gracias por permitirme ser parte de tan bonita profesión.



I.- RESUMEN

El presente documento es un trabajo de investigación enfocado a temas relacionados a la ingeniería civil, en caso particular para la ciudad de Morelia, Michoacán, México. El tema se enfoca en el estudio de un método para la elaboración de mezclas asfálticas elaboradas en frío con emulsiones asfálticas. En el documento se hablará de los componentes de las emulsiones, antecedentes de ellas desde las primeras aplicaciones hasta los días actuales, haciendo con ello un punto de partida a las técnicas utilizadas actualmente. En el documento se abordarán los métodos de diseño conocidos como “compresión axial y diametral”, siendo limitado para esta investigación, solamente a efectuar la parte de diseño que comprende a la compresión axial y todas las pruebas y procesos que se realizan para obtener un contenido óptimo de material ligante, en este caso, emulsión asfáltica. Y el método “Marshall” aplicado para mezcla asfáltica de granulometría densa con una intensidad de tránsito $\Sigma L \leq 10^6$, guiándonos en el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas No.19, para efectuar los procesos y pruebas que se realizan para obtener un contenido óptimo de material ligante, que al igual que el método anterior también es emulsión asfáltica.

Palabras clave: mezclas asfálticas, emulsiones, métodos, contenido óptimo, diseño.

II.- ABSTRACT

This document is a research work focused on topics related to civil engineering, in particular case for the city of Morelia, Michoacán, Mexico. The subject focuses on the study of a method for the preparation of asphalt mixtures cold processed with asphalt emulsions. The document will discuss the components of the emulsions, antecedents of them from the first applications to the current days, thereby making a starting point to the techniques currently used. The document will address the design methods known as "axial and diametral compression", being limited to this research, only to carry out the design part that includes axial compression and all the tests and processes that are carried out to obtain a content optimal binder material, in this case, asphalt emulsion. And the "Marshall" method applied for asphaltic mixture of dense granulometry with a traffic intensity $\Sigma L \leq 10^6$, guiding us in the Basic Manual of Asphalt Emulsions No.19, to carry out the processes and tests that are carried out to obtain an optimum content of binder material, which like the previous method is also asphalt emulsion.

key words: asphalt mixtures, emulsions, methods, optimal content.



III.- JUSTIFICACIÓN

Las malas condiciones en las que se encuentran la mayoría de las vialidades de la ciudad y el alto aforo vehicular, han generado la afectación continua de automóviles particulares; y es que, según datos oficiales del Ayuntamiento de Morelia, diariamente se reciben entre 3 y 6 quejas y solicitudes para la reparación de vehículos que tuvieron la mala suerte de caer en uno de los cientos de miles de baches de esta ciudad.

La condición es compleja. Hasta este año, estudios generados por diputados locales revelaron que el 90 por ciento de las calles de Morelia se encuentran en malas condiciones y de que requieren intervenciones intensivas para salir adelante, así como de presupuestos que rebasan por mucho, las capacidades financieras del municipio.

Los baches causados por lluvias, y camuflajeados por las mismas resultan ser peligrosos para los conductores, debido a que son los responsables de diversos accidentes automovilísticos que incluso llegan a terminar en fatalidad. En la mayoría de los casos se pueden tronar las llantas de los vehículos o causar otros daños a la unidad.

En algunos casos de los hoyos en el asfalto cuentan con una gran dimensión de hasta medio metro de ancho y aproximadamente 15 centímetros de profundidad, lo cual podría generar más accidentes.

En tanto las vialidades de Morelia se han convertido en un riesgo para los propios automovilistas, las autoridades han argumentado un rezago en mantenimiento a las calles de esta ciudad de por lo menos 25 años, lo cual, con la llegada de las primeras lluvias del año, se reciente en la población.

IV.- HIPOTESIS

El diseño de una mezcla asfáltica en frío con materiales volcánicos de la zona de Morelia para aplicación en bacheo ayudará a resolver el gran problema que afecta a las vialidades de Morelia, además de una correcta ejecución a la hora de reparar el bache, serán factores indispensables para erradicar el problema presente, además de tratamientos preventivos aplicados a tiempo.



V.- OBJETIVOS

VI.- OBJETIVO GENERAL

Diseñar una mezcla asfáltica en frío con materiales volcánicos de la zona de Morelia que sea capaz de resistir las inclemencias del tiempo, así como los factores que recibe por parte de los vehículos que transitan día a día por ella, logrando así que las vialidades que han sido afectadas, puedan ser reparadas y logren ser más duraderas.

VII.- OBJETIVOS PARTICULARES

- Estudiar los materiales volcánicos de la zona de Morelia para poder determinar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica para ese tipo de material, basado en sus características de resistencia y deformación.
- Elaborar especímenes y pastillas con tal de comparar los resultados de ambos y así lograr el porcentaje óptimo para ambos casos de experimentación.
- Promover el uso de mezclas en frío y la correcta aplicación de ésta para lograr excelentes resultados y con ello obtener vialidades de buena calidad.



1.- INTRODUCCIÓN

Las carreteras o caminos son una vía de comunicación que se emplean para el transporte de personas, alimentos, mercancías, ente otras. Debido a esto el hombre se ha visto en la necesidad de aplicar ciertas mejoras y adaptaciones para que estas sean más cómodas, rápidas y seguras, para que cumplan de la mejor manera su labor.

En nuestro país las vialidades con las que actualmente contamos fueron construidas la gran mayoría hace 40 años, desde entonces el tráfico y los sistemas de carga han ido en aumento, poniendo en riesgo la capacidad estructural con la que fueron diseñadas. Debido a esto, presentan daños en las capas superiores e inferiores. Es aquí donde la rehabilitación de carreteras o caminos haciendo uso del diseño de mezclas para la rehabilitación mediante el bacheo.

Como es bien sabido que los sistemas de transporte de un país influyen significativamente en el desarrollo y crecimiento anual de la economía, ya que la eficiencia de operación de ellos puede abatir considerablemente los gastos que personas y mercancías tienen por concepto de transporte de un sitio a otro.

Debido al uso de la infraestructura de un modo de transporte, estas sufren desgastes o deterioro gradual e inevitable, que tarde o temprano acabara con su vida útil. Esto lleva a mantenimientos preventivos o periódicos para conservarlas en buenas condiciones y alargar su periodo de vida, obteniéndose menores costos de operación, menores impactos negativos en el medio ambiente y mayor rendimiento en la inversión que se hace en estos rubros.

El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua de cargas vehiculares y de las condiciones meteorológicas. Tomando en cuenta estos dos factores, junto al envejecimiento natural de los materiales, hacen que el pavimento sufra un proceso de deterioro. Este envejecimiento y deterioro provocan que el pavimento tenga una disminución paulatina de sus niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores se hace necesaria una operación de conservación. La conservación de la red carretera es en la actualidad un aspecto de gran importancia debido a los recursos que en ella se movilizan

Teniendo en cuenta que al aplicarle un mantenimiento a las vialidades debe de ser con el mismo material con el cual fueron elaboradas ya que esto ocasiona que cuando quieras aplicar una rehabilitación de la vialidad te resulte difícil e incluso dañino a los equipos con los cuales se realizará el trabajo, es decir, si a una vialidad que tiene una capa de rodadura de mezcla asfáltica le queremos tapar un bache con concreto hidráulico, será perjudicial y contraproducente para los usuarios y para el personal encargado de darle el mantenimiento a las vialidades, ya que el asfalto no se junta de una manera correcta con el concreto hidráulico produciendo así una



junta fría y a largo plazo generando un bache de mayor dimensión alrededor del concreto hidráulico.

La creciente sensibilización social acerca de la importancia y necesidad de preservar el medio ambiente ha hecho que la legislación sea hoy mucho más proteccionista que en el pasado.

Por lo que en el presente trabajo trata sobre el diseño de mezcla asfáltica en frío con el fin de ser utilizada para el método de conservación denominado “bacheo”, ya que la mezcla asfáltica está constituida por la mezcla de material pétreo con un ligante, que en este caso se trata de emulsión asfáltica, al utilizar este ligante se reduce al mínimo el uso de sistemas de combustión para generar calor y poder realizar la mezcla.

Inicialmente se estudiaron los materiales con los cuales se realizará la mezcla para poder determinar la calidad de estos y además determinar las características necesarias para poder realizar los cálculos que indica el método utilizado.

Se abordaron dos tipos de diseños para la mezcla asfáltica, el método “compresión axial y diametral” y el método “Marshall aplicado para mezcla asfáltica de granulometría densa con una intensidad de tránsito $\Sigma L \leq 10^6$ ”

El primer método consiste en la obtención del valor de estabilidad por medio de especímenes de forma cilíndrica de 12.5 cm de diámetro y 15-20 cm de altura, se mezcla conforme especifica el método, se elaboran estos especímenes y se prueban para poder determinar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica con el cual obtuvimos el mayor valor de estabilidad, es decir, la mayor resistencia.

El segundo método consiste en elaborar pastillas de 4” de diámetro y 2.5” de altura, valores que marca la norma, para poder determinar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica, es decir, el porcentaje que presente mejores resultados respecto a los requisitos de estabilidad y flujo, el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica será el que tenga un valor alto de estabilidad junto con un valor pequeño de flujo, además de que cumplan con los requisitos marcados en la norma para este método de diseño



2.- ESTADO DEL ARTE

2.1.- GENERALIDADES DEL ASFALTO

El asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido, a temperatura ambiente. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual permite cubrir las partículas de los agregados pétreos. Por lo que se puede considerar como un material visco-elasto-termoplástico.

El asfalto es un producto de la refinación del petróleo, el cual se obtiene de la destilación del crudo entre los 450 °C y los 500 °C.

Dentro de los productos asfálticos que se pueden obtener de los asfaltos son los siguientes:

- a) Cemento asfáltico
- b) Emulsiones asfálticas
- c) Asfaltos modificados
- d) Asfaltos espumosos
- e) Asfaltos rebajados

Algunas de las aplicaciones que han tenido con el paso de los años los productos asfálticos son las siguientes:

- a) Calafateo de barcos.
- b) Momificación.
- c) Estabilidad de suelos.
- d) Tratamientos de la piel.
- e) Recubrimiento de acueductos.
- f) Revestimiento de caminos.

Hoy en día los productos asfálticos tienen gran impacto en la infraestructura de las carreteras, ya que más del 70% son a base de mezclas asfálticas.

En esta investigación se trabajará con emulsiones asfálticas, por lo cual a continuación se desarrollará ampliamente.

2.2.- DEFINICIÓN “EMULSIÓN”

- Mezcla de dos líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea. Un líquido (la fase dispersa) es dispersado en otro (la fase continua o fase dispersante).



- Dispersión en forma de partículas muy finas de un líquido en otro líquido en el que no es soluble
- Sistema heterogéneo con dos o más fases líquidas consistiendo de una fase líquida continua y al menos una segunda fase líquida dispersa en la primera en forma de gotas finas

Algunas emulsiones son de origen natural, aunque la gran mayoría son enteramente artificiales. Sin embargo, la distinción se está volviendo cada vez más difícil de realizar, ya que la mayoría de las emulsiones naturales pasan por un número de tratamientos en el intervalo de su extracción natural y su uso final, así que la emulsión “natural” no es 100% natural.

Ejemplos:

1. Leche
2. Mantequilla
3. Látex naturales

Con mucha frecuencia, las emulsiones son clasificadas por el tipo de fase continua. Ya que las emulsiones usadas con más frecuencia son las basadas en una fase acuosa y una fase oleosa, aquellas con una fase acuosa continua y una fase oleosa dispersa son conocidas como **emulsiones directas** o alternamente L/H (L, representando el prefijo lipo y H el prefijo hidro, anteriormente conocidas como H/E indicando aceite en agua).

La mantequilla, margarina, “cremas de noche” cosméticas (cold creams), grasas lubricantes y fluidos de corte son ejemplos típicos de esta categoría. (AMAAC, 2010)

2.2.1.- Clasificación de acuerdo al tamaño de partículas

Las emulsiones son frecuentemente clasificadas basándose en el tamaño de sus partículas, esto es de sus gotas. Sin embargo, esto representa dificultad en la nomenclatura que ocasionalmente es contradictoria por cuestiones históricas.

Por ejemplo, con frecuencia se refieren a las **microemulsiones** como emulsiones extremadamente finas con tamaño de partícula en el rango de 10 a 50 nm. Tal tamaño de partícula limita las interacciones con la luz, haciéndolas esencialmente transparentes. (AMAAC, 2010).



2.2.2.- Clasificación de acuerdo a la concentración de la fase dispersa

Otro método de clasificación usado comúnmente reside en el contenido de la fase concentrada. Estrictamente aplicada, la clasificación está en realidad basada en las propiedades reológicas de las emulsiones y en consecuencia depende en la fracción por volumen más que por peso. Sin embargo, los umbrales de concentración están definidos de una manera relativamente ambigua y el uso de fracciones en peso no cambia los datos de manera fundamental.

Uno distingue primero las condiciones de concentración en las que la emulsión se dice que está diluida, típicamente correspondiente a una concentración en volumen menor al 10%. Esta definición se ha derivado de la observación que más allá de esta concentración, las gotas que forman las emulsiones en ausencia de fenómenos de agregación no presenta alteración en su movilidad debido a la presencia de gotas en su cercanía. La emulsión entonces tendrá una viscosidad apenas superior a la de la fase continua. Entre el 10 y hasta 65 o 70%, dependiendo en particular de la distribución del tamaño de partícula, el termino de semi-diluido se usa ocasionalmente, dentro del cual las interacciones entre las gotas empiezan a ser significativas. Este estado produce un apreciable incremento en la viscosidad de la emulsión, que puede ser 10 o 100 veces mayor que aquella de la fase continua. (AMAAC, 2010)

2.2.3.- Clasificación de acuerdo al emulsificante

Finalmente existe un método de clasificación basado en el emulsificante. Por ejemplo, las emulsiones basadas en emulsificantes sólidos (arcillas, talco, sílice coloidal) son conocidas como **emulsiones de pickering** en referencia al trabajo del científico con el mismo nombre a principios del siglo XX.

Las emulsiones que usan un surfactante como emulsificante son denominadas con el mismo nombre que el del surfactante, así que uno habla de emulsiones aniónicas, emulsiones catiónicas, emulsiones no iónicas o emulsiones anfotéricas. (AMAAC, 2010)

2.2.4.- Agentes Superficiales

Para que una emulsión tenga un mínimo de estabilidad en el tiempo, un requisito para usarla, es obligatorio que contenga uno o más surfactantes o agentes tensoactivos. El estándar francés NF EN ISO 862 proporciona la siguiente definición: “compuesto químico con actividad superficial que, cuando se disuelve en



un líquido, especialmente agua, disminuye su tensión superficial o interfacial por adsorción preferencial en la superficie vapor/líquido u otras interfaces”.

Las moléculas que corresponden a esta definición tienen dos afinidades (anfipático) en conflicto:

- Una parte consiste en un grupo polar con propiedades hidrofílicas (endofílico con relación al agua),
- Otra parte consiste de un radical no polar dándole propiedades lipofílicas (exofílicas con relación al agua).

Debido a esta dualidad, se dice que estas sustancias son anfílicas. (AMAAC, 2010)

Estas propiedades son:

- Poder detergente
- Poder para suspender
- Poder solubilizante
- Poder dispersante
- Poder anti sedimentación
- Poder humectante
- Poder espumante
- Poder emulsificante
- Poder quelante
- Poder complejante
- Poder secuestrante

2.3.- HISTORIA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS

Las emulsiones fueron desarrolladas por primera vez a comienzos del siglo XX. Fue en los años 20 cuando su uso se generalizó a las aplicaciones de riego (spray applications) y como paliativos de polvo (dust palliatives). El uso de las emulsiones asfálticas creció de manera relativamente lenta, limitado por el tipo de emulsiones disponibles y por la falta de conocimientos sobre su correcta aplicación. El desarrollo ininterrumpido de nuevos tipos y grados, sumado a equipos de construcción y prácticas mejorados, ofrece ahora una amplia gama de elección.

Entre 1930 y mediados de 1950, hubo un lento pero firme incremento en el volumen de emulsiones utilizadas. En los años siguientes a la Segunda Guerra mundial, el volumen y las cargas de tránsito crecieron a tal punto que los ingenieros viales comenzaron a reducir el empleo de emulsiones asfálticas. En cambio, optaron por



utilizar mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico como ligante. El volumen de cemento asfáltico empleado ha crecido enormemente desde 1953, en cambio el uso en conjunto de otros productos asfálticos se ha mantenido casi constante. Pero ha habido un firme aumento en el volumen de emulsiones asfálticas utilizadas.

A continuación, se presentan varios factores que han contribuido al interés en el uso de las emulsiones asfálticas:

- La crisis energética de comienzos de los años 70. Obligó a tomar medidas de conservación de la energía lo cual influyó en el uso de las emulsiones asfálticas, las cuales pueden utilizarse en la mayoría de los casos sin necesidad de calentamiento.
- Preocupación por reducir la contaminación atmosférica. Las emulsiones asfálticas eliminan hacia la atmosfera poca o nada de sustancias hidrocarbonadas.
- La capacidad de ciertos tipos de emulsiones de recubrir la superficie de agregados húmedos. Esto reduce las necesidades de combustible para calentar y secar los agregados.
- La existencia de una variedad de tipos de emulsión. Se han desarrollado nuevas formulaciones y técnicas de laboratorio mejoradas con el fin de satisfacer los requerimientos de diseño y construcción.
- La aplicabilidad de emulsiones en mantenimiento preventivo de pavimentos, incrementando la vida útil de pavimentos existentes ligeramente deteriorados. (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)

2.4.- COMPOSICIÓN DE LAS EMULSIONES

Una emulsión asfáltica consiste de tres ingredientes básicos: asfalto, agua y un agente emulsificante. En algunas ocasiones, la emulsión puede contener otros aditivos, como estabilizantes, mejoradores de recubrimientos, mejoradores de adherencia, o agentes de control de rotura.

Es bien sabido que el agua y el asfalto no se mezclan, excepto en condiciones cuidadosamente controladas, utilizando equipos de alta especialización y aditivos químicos. Mezclar agua y asfalto es una tarea similar a la del mecánico que intenta lavar, solo con agua, sus manos engrasadas. Solo con detergente o con un agente jabonoso la grasa puede ser exitosamente removida. Las partículas de jabón rodean a los glóbulos de grasa, rompen la tensión superficie que los mantiene unidos, y permiten que sean eliminados.



Algunos de los mismos principios físicos y que se aplican se aplican a la formulación, producción y uso de emulsiones asfálticas. El objetivo es lograr una dispersión estable del cemento asfáltico en el agua –suficientemente estable para ser bombeada, almacenada, durante tiempo prolongado, y mezclada. Más aún, la emulsión deberá “romper” rápidamente tras entrar en contacto con el agregado en un mezclador, o tras ser distribuida sobre la cancha- “rotura” es la separación del agua del asfalto. Al curar, el residuo asfáltico conserva toda la capacidad adhesiva, la durabilidad, y la resistencia al agua propias del cemento asfáltico con el cual fue elaborado. (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)

2.5.- CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFALTICAS

Las emulsiones asfálticas se clasifican en tres categorías: aniónicas, catiónicas, y no iónica. En la práctica, las dos primeras son las más ampliamente utilizadas en la construcción y mantenimiento de carreteras. Las no iónicas pueden ganar en importancia a medida que la tecnología de emulsiones avance. Las denominaciones catiónica y aniónica se refieren a las cargas eléctricas que rodean a las partículas de asfalto. Este sistema de identificación se basa en una ley de electricidad básica – las cargas iguales se repelen y las cargas opuestas se atraen. (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)

TABLA 1.- CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS (SCT, 2006)

Clasificación	Contenido de cemento asfáltico en masa %	Tipo	Polaridad
EAR-55	55	Rompimiento rápido	Aniónica
EAR-60	60		
EAM-60	60	Rompimiento medio	
EAM-65	65		
EAL-55	55	Rompimiento lento	
EAL-60	60		
EAI-60	60	Para impregnación	
ECR-60	60	Rompimiento rápido	Catiónica
ECR-65	65		
ECR-70	70		
ECM-65	65	Rompimiento medio	
ECL-65	65	Rompimiento lento	
ECI-60	60	Para impregnación	
ECS-60	60	Sobrestabilizada	



Cuando una corriente eléctrica circula a través de un líquido en el que están sumergidos dos polos (un ánodo y un cátodo), el ánodo se carga positivamente y el cátodo se carga negativamente. Si una corriente eléctrica pasa a través de una emulsión que contiene partículas de asfalto cargadas negativamente, éstas migrarán al ánodo. De aquí el nombre de emulsión aniónica. A la inversa, en el caso de emulsiones con partículas de asfalto cargadas positivamente, dichas partículas migrarán hacia el cátodo; se trata de una emulsión catiónica. En el caso de emulsiones no iónicas, las partículas de asfalto son eléctricamente neutras, y no emigran a polo alguno.

Una segunda clasificación de las emulsiones se basa en la velocidad con que las gotitas de asfalto coalescen, esto es, se juntan restaurando el volumen de cemento asfáltico. Los términos RS (rapid-setting, rotura rápida), MS (medium-setting, rotura media), y SS (slow-setting, rotura lenta), QS (quick-setting, rotura rápida QS) han sido adoptados para simplificar y normalizar esta clasificación. Son solo términos relativos que implican, respectivamente, rotura rápida, rotura media, rotura lenta, rotura rápida (QS). La tendencia a coalescer está íntimamente relacionada con la rapidez con que la emulsión se vuelve inestable y rompe tras entrar en contacto con la superficie del agregado. Una emulsión RS(RR) tiene poca o ninguna capacidad de mezclarse con agregados; es de esperar de una MS (RM) que se mezcle con agregado grueso y no se mezcle con agregado fino; y las emulsiones SS (RL) y QS (RR QS) se diseñan para mezclarse con agregados finos, esperándose que las QS (RR QS) rompa más rápidamente que la SS (RL).

Finalmente, las emulsiones se identifican con una serie de números y letras que aluden a la viscosidad de las emulsiones y a la consistencia de la base de cemento asfáltico. La letra “C”, encabezando el tipo de emulsión, identifica a una emulsión catiónica. La ausencia de la “C” identifica a las emulsiones aniónicas, según las especificaciones de ASTM (American Society for Testing and Materials) y de AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Por ejemplo, RS-1 (RR-1) es una emulsión aniónica y CRS-1 (CRR-1) es una emulsión catiónica.

Los números en la clasificación indican la viscosidad relativa de la emulsión, por ejemplo, una emulsión MS-2 (RM-2) es más viscosa que una emulsión MS-1 (RM-1). La “h” incluida en algunos grados significa simplemente que la base asfáltica es más consistente (o dura, hard). La “s” significa que la base asfáltica es más blanda (soft).

Las letras “HF” que preceden a algunos de los grados de emulsiones aniónicas indican alta flotación (high-float), medida con el ensayo de flotación. Las emulsiones de alta flotación tienen características de gel, impartidas por la adición de ciertas sustancias químicas; estas características permiten la formación de una película de asfalto más gruesa alrededor del agregado, impidiendo la separación del asfalto de las partículas del árido. Estos grados de emulsiones se usan principalmente para



mezclas de planta en caliente y en frío, para sellados y para mezclas en camino. (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)

ASTM y AASHTO han desarrollado especificaciones normalizadas para estos grados de emulsión:

TABLA 2.- GRADOS DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)

Emulsión asfáltica (ASTM D977, AASHTO M140)	Emulsión Asfáltica Catiónica (ASTM D2397, AASHTO M208)
RS-1 (RR-1)	CRS-1 (CRR-1)
RS-2	CRS-2
HFRS-2	-----
MS-1 (RM-1)	-----
MS-2	CMS-2 (CRM-2)
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	-----
HFMS-2	-----
HFMS-2h	-----
HFMS-2s	-----
SS-1 (RL-1)	CSS-1 (CRL-1)
SS-1h	CSS-1h

2.6.- ELABORACION DE LA EMULSIÓN

El equipo básico para preparar emulsiones incluye un dispositivo mecánico de alta velocidad, de altas tensiones de corte (usualmente un molino coloidal), para dividir el asfalto en pequeñísimas gotas. También se necesitan un tanque para la solución de emulsivo, un tanque para el asfalto caliente, bombas, y medidores de caudal.

El molino coloidal posee un rotor de alta velocidad (17-100 Hz o 1000-6000 RPM) con gálibos de paso en el orden de 0.25 a 0.50 mm (0.01 – 0.02 pulgadas). Típicamente, las gotitas de las emulsiones asfálticas tienen tamaños inferiores al diámetro de un cabello humano, esto es, alrededor de 0.001 a 0.010 mm (0.00004 a 0.0004 pulgadas). Comúnmente se emplean analizadores de tamaños de partículas para caracterizar la calidad de la emulsión. El tamaño de las gotitas de asfalto depende de la energía mecánica unitaria aplicada por el molino.

Para medir las cantidades de asfalto y de solución emulsiva que ingresan en el molino coloidal se utilizan sendas bombas. Debido a que la solución emulsiva puede



ser altamente corrosiva, puede ser necesario emplear equipos construidos con materiales resistentes a la corrosión. (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)

2.6.1.- Proceso de Emulsificación

Durante el proceso de emulsificación, se alimenta el molino coloidal con asfalto caliente, el cual es dividido en pequeñísimas gotitas. Al mismo tiempo, ingresa en el molino coloidal el agua conteniendo el agente emulsivo. El asfalto que ingresa en el molino coloidal se calienta para alcanzar una baja viscosidad; la temperatura del agua se ajusta para optimizar el proceso de emulsificación. Estas temperaturas varían, dependiendo de las características de emulsificación del cemento asfáltico y la compatibilidad entre el asfalto y el agente emulsivo. Debido a que la temperatura de la emulsión al abandonar el molino debe ser inferior al punto de ebullición del agua, el asfalto no se lleva a temperaturas extremadamente altas, a menos que se emplee un enfriador. Luego, la emulsión es usualmente bombeada a tanques de almacenamiento a granel. Estos tanques pueden estar equipados con agitadores mecánicos para mantener la uniformidad de la emulsión

El método de incorporación del emulsivo al agua varía de acuerdo con el procedimiento empleado por el fabricante. Para ser solubles en agua, algunos emulsivos, como las aminas, deben mezclarse y reaccionar con un ácido; otros, como los ácidos grasos, deben mezclarse y reaccionar con un álcali. La mezcla del emulsivo se hace comúnmente en un tanque de mezclado por pastones. El emulsivo es incorporado al agua caliente que contiene ácido o álcali, y es agitado hasta su completa disolución.

Las proporciones de asfalto y de solución emulsificante deben medirse con exactitud. Esto se hace normalmente con medidores de caudal; pero también pueden controlarse las proporciones con verificando la temperatura de cada fase y la descarga del molino. Si se utiliza el método de regulación de la temperatura, a partir de los componentes se calcula la temperatura deseada de salida de la emulsión ya elaborada; así se controla el porcentaje de contenido de asfalto.

El tamaño de las partículas de asfalto es un factor vital en la elaboración de una emulsión estable. (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)

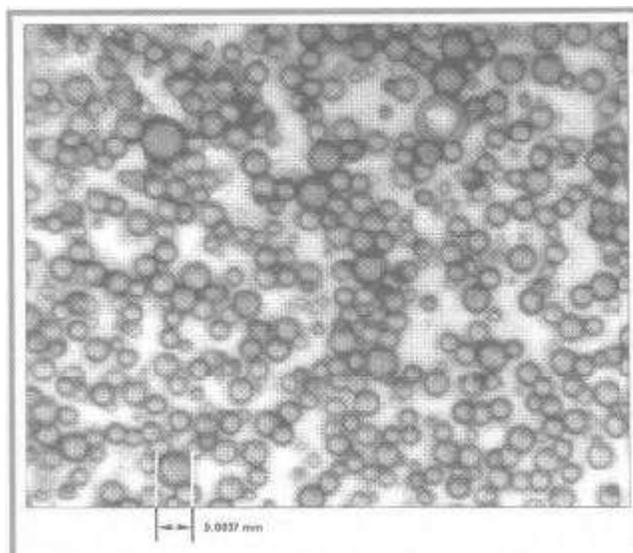


FIGURA 1.- TAMAÑOS RELATIVOS Y DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE ASFALTO EN UNA EMULSIÓN (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)

Una fotografía a nivel microscópico de una típica emulsión pone en evidencia estos promedios de tamaños de partículas:

Menor de 0.001mm (μm)	28%
0.001 – 0.005 (1 – 5 μm)	57%
0.005 – 0.010 (5-10 μm)	15%

Estas gotitas de asfalto de tamaño microscópico se dispersan en el agua en presencia del emulsivo tensio-activo (surfactante). El surfactante produce un cambio en la tensión superficial en el área de contacto entre las gotitas de asfalto y el agua, permitiendo así que el asfalto permanezca en suspensión. Las partículas de asfalto, todas con similares cargas eléctricas, se repelen entre sí, lo que ayuda a mantenerlas suspendidas. (Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, 1992)



3.- CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1.- DEFINICIÓN:

Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo.



FIGURA 2.- DESCRIPCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA (Olvera, 2013)

Las mezclas asfálticas, según el procedimiento de mezclado, se clasifican como sigue:

- Mezclas asfálticas en caliente.
- Mezclas asfálticas en tibio.
- Mezclas asfálticas en frío.

3.2.- MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla.

Estas mezclas se elaboran generalmente en plantas mezcladoras estacionarias, son las que tienen mayor temperatura durante el proceso de elaboración alcanzando los **145°C** o más, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos. (Olvera, 2013)



FIGURA 3.- ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (BARDASANO G., 2015) [10/07/2019]



FIGURA 4.- ELABORACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE (GUTIÉRREZ, 2018) [10/07/2019]

Las carpetas asfálticas con mezcla en caliente se construyen para proporcionar al usuario una superficie de rodamiento uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Cuando son de un espesor mayor o igual que 4 centímetros, las carpetas de granulometría densa tienen además la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento. (Olvera, 2013)



FIGURA 5.- DEFORMACIONES EN CAPAZ DE PAVIMENTO (PADILLA R., 2014) [10/07/2019]



Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

3.2.1.- Mezcla asfáltica de granulometría densa

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre treinta y siete coma cinco (37,5) milímetros (1 ½ in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros (¾ in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes. (IMT, 2016)

TABLA 3.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa (N-CMT-4-04-17, 2017)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo ^[1] mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (¾)	12,5 (½)	19 (¾)	25 (1)	37,5 (1½)
Porcentaje que pasa (en masa)						
50	2 in	---	---	---	---	100
37,5	1½ in	---	---	---	100	90 - 100
25	1 in	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	¾ in	---	100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	½ in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	¾ in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	¼ in	70 - 89	56 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	Nº4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	Nº10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	Nº20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	Nº40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	Nº60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	Nº100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	Nº200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

3.2.2.- Mezcla asfáltica de granulometría abierta

Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre doce coma cinco (12,5) milímetros (½ in) y seis coma tres (6,3) milímetros (¼ in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula E. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa, con la finalidad principal de satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito, al permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se minimiza el



acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. Las mezclas asfálticas de granulometría abierta no se colocarán en zonas susceptibles al congelamiento ni donde la precipitación sea menor de seiscientos (600) milímetros por año. (IMT, 2016)

TABLA 4.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA ABIERTA (N-CMT-4-04-17, 2017)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)
		12,5 (1/2)
Abertura mm	Designación	Porcentaje que pasa (en masa)
19	3/4 in	100
12,5	1/2 in	65 – 100
9,5	3/8 in	48 – 72
6,3	1/4 in	30 – 52
4,75	N°4	18 – 38
2	N°10	15 - 33
0,85	N°20	12 – 28
0,15	N°100	5 - 19
0,075	N°200	2 – 4

3.2.3.- Mezcla asfáltica de granulometría discontinua, tipo SMA

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre diecinueve coma cero (19,0) milímetros (3/4 in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros (3/8 in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula F. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito. Cuando son usadas como capas de rodadura su finalidad principal es mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional. Al tener una elevada macrotextura se evita que el agua de lluvia forme una película continua sobre la superficie del pavimento, con lo que se incrementa la fricción de las llantas; se minimiza el acuaplaneo; se reduce la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes; se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura. (IMT, 2016).



TABLA 5.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DISCONTINUA, TIPO SMA (N-CMT-4-04-17, 2017)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)		
		6,3 (¼)	9,5 (¾)	12,5 (½)
Abertura mm	Designación	Porcentaje que pasa (en masa)		
19	¾ in	---	---	100
12,5	½ in	---	100	90 - 100
9,5	¾ in	100	70 - 95	50 - 80
6,3	¼ in	56 - 66	43 - 68	29 - 50
4,75	Nº4	30 - 45	30 - 50	20 - 35
2	Nº10	19 - 26	19 - 29	15 - 23
0,85	Nº20	16 - 22	15 - 22	13 - 20
0,075	Nº200	9 - 12	8 - 12	8 - 11

3.3.- MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO

Son las elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas y materiales pétreos. (IMT, 2016)



FIGURA 6. - PLANTA ASFÁLTICA EN FRÍO (QUIMIASFALT,2019) [10/07/2019]

Las mezclas asfálticas en frío se clasifican a su vez en:

3.3.1.- Mezcla asfáltica de granulometría densa

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica y materiales pétreos, con tamaño nominal entre treinta y siete coma cinco (37,5) milímetros (1 ½ in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros (¾ in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Normalmente se utiliza en los casos en que la intensidad del tránsito ($\square L$) es igual a un (1) millón de ejes equivalentes o



menor, en donde no se requiera de una alta resistencia estructural, para la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos y en carpetas para el refuerzo de pavimentos existentes, así como para la reparación de baches. (IMT, 2016)

TABLA 6.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA (IMT, 2017)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo [1] mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 ($\frac{3}{8}$)	12,5 ($\frac{1}{2}$)	19 ($\frac{3}{4}$)	25 (1)	37,5 ($1\frac{1}{2}$)
Porcentaje que pasa (en masa)						
50	2 in	---	---	---	---	100
37,5	1½ in	---	---	---	100	90 - 100
25	1 in	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	$\frac{3}{4}$ in	---	100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	$\frac{1}{2}$ in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	$\frac{3}{8}$ in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	$\frac{1}{4}$ in	70 - 89	56 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	N°4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	N°10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	N°20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	N°40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	N°60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	N°100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	N°200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

3.3.2.- Mortero asfáltico

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica, agua y arena con tamaño máximo de dos coma treinta y seis (2,36) milímetros (N°8), que satisfaga los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula F. de la Norma N·CMT·4·04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. Normalmente se coloca sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura. (IMT, 2016)



FIGURA 7.- MORTERO ASFÁLTICO (GOOGLE, 10/07/2019)



3.4.- MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS O TEMPLADAS

La mezcla asfáltica templada, está constituida de agregados pétreos de $\frac{3}{4}$ ” a finos, con AC-20 y aditivo, su temperatura de producción va de un rango de **120 ° C a 125 ° C**, estando por debajo de las convencionalmente empleadas, lo cual la hace potencialmente más ecoeficiente.

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

Ofrece beneficios económicos y ambientales, sin sacrificar la calidad del producto terminado, así como mejoras en las condiciones laborales del personal de obra, al ser posible iniciar su proceso de compactación entre **95°C a 97°C, generando** disminución de la radiación térmica, además su facilidad de aplicación, por lo mencionado anteriormente el personal no inhala tantos gases producto de la combustión del asfalto a mayores temperaturas.

Esta forma de homogenizar tiene la finalidad de garantizar un revestimiento correcto del esqueleto granular, una mezcla homogénea y una compactabilidad adecuada durante el proceso de tendido y compactación.

La intención de disminuir la temperatura en dichas mezclas es con la finalidad de reducir el consumo energético y bajar la contaminación durante la producción y tendido de las mezclas asfálticas; la reducción de temperatura, en la elaboración de las mezclas es posible mediante el asfalto espumado, el cual puede ser obtenido por la inclusión de un aditivo o agua durante su elaboración o bien se puede utilizar un aditivo reductor, en forma de cera uno de estos puede ser el conocido como **vipav** que realmente es un polímero plástico y es el que más comúnmente, emplea la planta de asfaltos de la Ciudad de México, esto es con el propósito de reducir la viscosidad, además de provocar que la mezcla no pierda fluidez y se pueda compactar de manera adecuada a menores temperaturas que las convencionales (**entre 110°C a 120° C**). (Olvera, 2013)

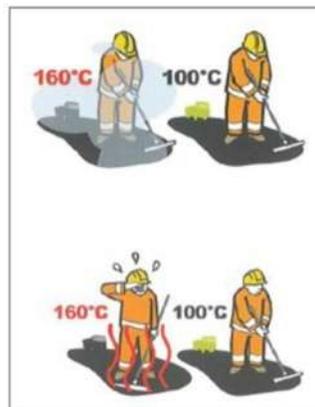


FIGURA 8.- MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA (GOOGLE,10/07/2019)



4.- ESTUDIO DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA

4.1.- PRUEBAS EN EMULSIONES ASFÁLTICAS

4.1.1.- Destilación de Emulsiones Asfálticas

OBJETIVO DE LA PRUEBA:

La prueba consiste esencialmente en efectuar la destilación de una muestra de emulsión asfáltica, hasta una temperatura máxima de 260°C, para separarla en residuo asfáltico, agua y disolventes. En el residuo asfáltico se realizan otras pruebas que ayudan a identificar la emulsión. Cuando se requiera también identificar los disolventes, se separa de ellos una porción representativa de tamaño suficiente para su posterior análisis.

EQUIPO Y MATERIALES:

El equipo para la ejecución de la prueba debe estar en condiciones óptimas para su uso, calibrado, limpio, completo en todas sus partes y sin desgaste. Todos los materiales deben ser de calidad y emplearse dentro de la fecha de caducidad.

El equipo y los materiales necesarios son los siguientes:

- **ALAMBIQUE CILÍNDRICO**

De aleación de aluminio, con la forma y dimensiones especificadas en el manual.

- **QUEMADOR ANULAR DE GAS**

De 127 mm de diámetro interior, con perforaciones en el contorno interior.

- **UNIDAD DE CONDENSACIÓN**

Integrada por un adaptador, un tubo de conexión con camisa de lámina y refrigerante recto provisto de camisa metálica, todos ellos adaptados para conectarse.

- **PROBETA**

De vidrio, de 100 cm³ de capacidad y con graduaciones a cada 1 cm³.

- **TERMÓMETROS DE INMERSIÓN TOTAL**

Dos termómetros con rango de -2 a 300°C y aproximación de 1°C.

- **MECHERO DE GAS**

Del tipo Bunsen.



- **MALLA N°50**

De 300 μm de abertura.

- **BALANZA**

Con capacidad mínima de 3 500 g y aproximación de 0,1 g.

- **ESPÁTULA**

De níquel y 20 cm de longitud.

- **EMPAQUE**

De papel impregnado con aceite.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:

De la muestra de emulsión asfáltica, obtenida según se establece en el Manual M-MMP-4-05-001 *Muestreo de Materiales Asfálticos*, se toma una muestra de prueba de $200 \pm 0,1$ g colocándola en el alambique previamente tarado, incluyendo su tapa, abrazadera, termómetros y demás accesorios y se registra la masa total del conjunto (W_i). Se ajusta perfectamente la tapa del alambique utilizando su tornillo de presión y colocando, entre ésta y el alambique, el empaque de papel impregnado con aceite.

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA:

1. Se colocan los termómetros en la tapa del alambique, introduciéndolos en los orificios respectivos, con su correspondiente tapón de corcho ajustado y sujetándolos de tal manera que el bulbo de uno de ellos quede a 6 mm del fondo del alambique y el bulbo del otro quede aproximadamente a 165 mm de dicho fondo.



FIGURA 9.- PESO MUESTRA DE DESTILACIÓN (FOTO E. SALINAS R. 2019)

2. Se ensambla el equipo, conectando el alambique con el refrigerante y colocando el quemador anular de gas a una distancia de 15 cm del fondo del



alambique, se enciende el quemador, se ajusta con flama baja y se registra la hora en la que se inicie la aplicación de calor; también se aplica suficiente calor con el mechero Bunsen al tubo de conexión para evitar la condensación de agua en éste. Se vigila que no se registren cambios bruscos de temperatura en el termómetro superior, ya que esto indicaría que la espuma producida alcanzó la parte superior del alambique; en este caso será necesario disminuir la aplicación de calor para controlar dicha espuma.



FIGURA 10.- PROCESO DESTILACIÓN (FOTO E. SALINAS R., 2019)

3. Cuando la temperatura de la muestra de prueba pueda ser leída en el termómetro más bajo, lo que ocurre aproximadamente a 215°C , se baja el quemador anular al nivel del fondo del alambique y se eleva la temperatura de la muestra hasta 260°C , manteniendo esta temperatura durante un lapso de 15 min.
4. Inmediatamente después se suspende la aplicación de calor, se registra el tiempo total transcurrido desde que se inició su aplicación, se desconecta el alambique, se determina su masa con todos sus accesorios, se agrega a esta masa 1,5 g para compensar la flotación del alambique caliente y se registra como W_f . El tiempo total que dure la destilación debe ser de 60 ± 15 min. Se leen en la escala de la probeta y se registran, el nivel superior del destilado (V_{dw}) y el nivel superior del agua (V_w). Los diferentes niveles se definen al ocurrir la separación del disolvente y el agua, por su diferencia de densidad.
5. A continuación, si el residuo va a emplearse para efectuar otras pruebas, se destapa el alambique, se homogeneiza su contenido con la espátula y se vierte a través de la malla N°50, en los moldes o recipientes apropiados para efectuar las pruebas requeridas. En caso de ser necesario analizar o identificar el destilado, éste se colocará en recipientes adecuados que impidan su alteración.



CÁLCULOS Y RESULTADOS:

En esta prueba se calcula y reporta:

El residuo asfáltico de la destilación, expresado como un porcentaje de la masa inicial de la muestra de prueba, empleando la siguiente expresión:

$$A = \frac{200 - (W_i - W_f)}{200} \times 100$$

En donde:

R = Contenido de residuo asfáltico por destilación, en por ciento respecto a la masa inicial de la muestra de prueba

W_i = Masa del alambique y sus accesorios más la masa inicial de la muestra de prueba, (g)

W_f = Masa del residuo asfáltico, más la masa del alambique y sus accesorios calientes, más la corrección por temperatura, (g) (M-MMP-4-05-012-00, 2000)

Peso emulsión: 200 gramos

Peso alambique con emulsión: 4043 gramos

Peso alambique al finalizar prueba: 3972.5 gramos

$$A = \frac{200 - (4043 - 3972.5)}{200} \times 100 = 64.75 \%$$

De acuerdo a la norma N-CMT- 4-05-001-06 la emulsión **cumple** para una emulsión con el 65% de contenido de asfalto.

4.1.2.- Retenido en las Mallas N°20 Y N°60 en Emulsiones Asfálticas

OBJETIVO DE LA PRUEBA

Esta prueba permite cuantificar el asfalto de una emulsión que se retiene en las mallas N°20 y N°60, cuando contiene glóbulos de asfalto relativamente grandes, para estimar la uniformidad de la emulsión. La prueba consiste en hacer pasar a través de las mallas N°20 y N°60 una cantidad de emulsión y calcular los porcentajes de asfalto que se retienen en ellas.



EQUIPO Y MATERIALES:

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad, considerando siempre la fecha de su caducidad.

- **VASO DE PRECIPITADO**

De vidrio o aluminio, con capacidad de 1 000 cm³.

- **BALANZA**

De 2 000 g de capacidad y aproximación de 0,1 g.

- **MALLA N°20**

De 850 μ m de abertura.

- **MALLA N°60**

De 250 μ m de abertura.

- **FONDOS PARA MALLA**

Dos fondos, uno para cada malla.

- **HORNO**

Provisto de termostato que mantenga temperaturas hasta de 175°C, con aproximación de 2°C

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA:

1. Se obtiene la masa de la malla N°20 con su respectivo fondo y se registra en g, como W_{20} .



FIGURA 11.- PESO CHAROLA MÁS MALLA RET #20 (FOTO E. SALINAS R., 2019)



2. Se humedecen la malla, aplicando una capa delgada de la solución de oleato de sodio.
3. De la muestra de prueba, se vierten en el vaso de precipitado 1 000 g. Esta cantidad se hace pasar por la malla N°20, desechando lo que pase por la malla.



FIGURA 12.- PASO DE EMULSIÓN POR LA MALLA #20 (FOTO E. SALINAS R., 2019)

4. Enseguida se lavan el vaso y las mallas con la solución de oleato de sodio desechando la solución hasta que ésta salga limpia por la malla N°20.
5. Se inserta el fondo en su malla correspondiente. La malla con sus glóbulos retenidos se seca en el horno durante 2 h a una temperatura de 105°C. Se sacan del horno, se dejan enfriar a temperatura ambiente y se obtiene su masa, en g, registrándola como W_{r20} .

CÁLCULOS Y RESULTADOS:

Se calcula y reporta como el retenido en la malla N°20, el resultado de la siguiente fórmula:

$$R20 = \frac{Wr20 - Wt20}{10}$$

Donde:

R20= Material asfáltico retenido en la malla N°20, (%)

Wr20= Masa de la malla N°20 con su retenido y fondo, después de secarse en el horno, (g).

Wt20= masa de la malla N°20 y su fondo, sin retenido, (g). (M-MMP-4-05-014-02, 2002)



DATOS:

Wr20= 948.74 gr.

Wt20= 948.72 gr.

$$Ret \#20 = \frac{948.74 - 948.72}{10} = \frac{0.02}{10} = \mathbf{0.002}$$

De acuerdo con la norma N-CMT-4-05-001-06 nos indica que el valor máximo de retenido en la malla #20 es de 0.01, por lo cual el valor resultante de la emulsión estudiada si **cumple**.

4.1.3.- Viscosidad Saybolt- Furol

OBJETIVO DE LA PRUEBA:

Esta prueba permite conocer la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 135°C para los cementos, de 25 y 50°C para las emulsiones y de 50 y 60°C para los asfaltos rebajados, pudiéndose hacer a otras temperaturas, con el propósito de estudiar la susceptibilidad al calor de los materiales asfálticos y determinar las viscosidades apropiadas para su utilización.

La prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 60 cm³ del material a probar a través de un orificio Furol, instalado en un tubo de viscosidad Saybolt, bajo condiciones de carga y temperatura preestablecidas.

EQUIPO Y MATERIALES:

El equipo para la ejecución de la prueba ha de estar en condiciones óptimas para su uso, limpio, completo en todas sus partes y sin desgaste. Todos los materiales a emplear deben ser de primera calidad y de reciente adquisición.

- **VISCOSÍMETRO SAYBOLT – FUROL:**

Integrado por:

- Un tubo de viscosidad Saybolt y boquilla con orificio Furol, ambos de metal resistente a la corrosión, con la forma y dimensiones indicadas en el Manual. El tubo estará provisto con una tuerca en su parte inferior para fijarlo en posición vertical en el recipiente del baño y con un tapón de corcho u otro dispositivo similar que impida el flujo del material asfáltico, que tenga un cordón o cadena para facilitar su remoción.



- Una tapa metálica para el tubo de viscosidad, que consiste en una placa circular biselada, con diámetro inferior de aproximadamente 56 mm y 7 mm de espesor, con un orificio en el centro con diámetro ligeramente mayor que el del termómetro.
- Un baño de aceite, acondicionado para mantener el nivel del líquido en su interior 6 mm arriba del borde de derrame del tubo de viscosidad, y adaptado para sujetar dicho tubo en posición vertical. Estará equipado con un agitador, un sistema de control de temperatura con capacidad hasta de 235°C con aproximación de 0,2°C y una fuente de calor alejada por lo menos 3 cm del tubo de viscosidad.
- **MATRAZ DE VIDRIO:**

De la forma y dimensiones indicadas en el Manual, con capacidad de $60 \pm 0,05 \text{ cm}^3$, aforado a la temperatura de 20°C, con la marca de aforo en el cuello.

- **EQUIPO PARA FILTRADO:**

Se requiere de un embudo de la forma y dimensiones indicadas en el Manual, de metal resistente a la corrosión y provisto de una malla N° 20 (850 μm de abertura) cuando se prueben cementos asfálticos o N° 100 (150 μm de abertura) para asfaltos rebajados, fijada al embudo mediante un sujetador. Cuando se trate de emulsiones asfálticas, únicamente se requiere una malla N° 20 (850 μm de abertura) o tela de alambre con la misma abertura, montada en un marco.

- **TERMÓMETROS:**

Según el tipo de material por probar se requieren los siguientes termómetros:

- Cuando se prueben cementos asfálticos, un termómetro de inmersión total, con rango de 95 a 155°C y aproximación de 0,2°C.
- Cuando se prueben emulsiones asfálticas, dos termómetros de inmersión total, uno con rango de 15 a 30°C y otro de 45 a 65°C, ambos con aproximación de 0,1°C.
- Cuando se prueben asfaltos rebajados, un termómetro de inmersión parcial, con rango de -7 a 110°C y aproximación de 0,5°C.

- **PARRILLA ELÉCTRICA:**

De aproximadamente 20 cm de diámetro, con capacidad de 1 200 W, provista de control termostático.

- **CRONÓMETRO:**

Con aproximación de 1 s.

- **VASO DE PRECIPITADO:**

Para realizar la prueba en emulsiones asfálticas, además de lo ya mencionado, se requiere de un vaso de precipitado, de vidrio refractario y 400 cm^3 de capacidad.



- **PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:**

La preparación de la muestra de material asfáltico, obtenida según se establece en el Manual M-MMP-4-05-001 *Muestreo de Materiales Asfálticos*, se hace de la siguiente manera:

DE EMULSIONES ASFÁLTICAS:

La muestra de emulsión asfáltica por probar se homogeneiza mediante agitación moderada, evitando la formación de burbujas de aire y se vierten de ella 100 cm³ en el vaso de precipitado.

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA:

EN EMULSIONES ASFÁLTICAS:

Para realizar la prueba en emulsiones asfálticas se procede de la siguiente manera:

- Se llena el baño del viscosímetro con agua.
- Se limpia el tubo de viscosidad con xilol o petróleo diáfano y se seca perfectamente antes de utilizarlo. Para facilitar esta limpieza, después de cada prueba el tubo de viscosidad se llena con aceite, se vacía y enseguida se limpia con xilol.
- Una vez limpiado el tubo de viscosidad, se le inserta el tapón de corcho en su parte inferior, de manera que penetre de 6 a 9 mm, cuidando que ajuste herméticamente para evitar pérdidas de la muestra de prueba.
- Dependiendo de la temperatura a la que se realice la prueba, se calienta el baño del viscosímetro y la muestra de la emulsión asfáltica como se indica a continuación:

PARA PRUEBA A 25°C:

Se ajusta el baño a una temperatura de 25°C. A continuación se coloca en éste, durante 30 min, el vaso de precipitado que contiene la muestra de emulsión asfáltica de manera que su fondo quede abajo del nivel del agua aproximadamente 5 cm y se agita periódicamente su contenido, con movimientos circulares del termómetro a razón de aproximadamente 60 revoluciones por minuto, evitando la formación de burbujas.

PARA PRUEBA A 50°C

Se ajusta el baño a una temperatura de $60 \pm 3^\circ\text{C}$. A continuación, se coloca en éste, el vaso de precipitado que contiene la muestra de emulsión asfáltica de manera que su fondo quede abajo del nivel del agua aproximadamente 5 cm y se agita periódicamente su contenido, con movimientos circulares del termómetro a razón de aproximadamente 60 revoluciones por minuto, evitando la formación de burbujas. En las condiciones mencionadas se mantiene la muestra hasta que



alcance una temperatura de $51,4 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ y se procede como se indica en el Inciso siguiente.



FIGURA 13.- EMULSIÓN A 50°C (FOTO E. SALINAS R., 2019)

- Se vierte en el tubo de viscosidad la muestra de emulsión asfáltica calentada, filtrándola a través de la malla N° 20 o la tela de alambre, previamente entibiada y seca, hasta que la emulsión asfáltica se derrame en la cazoleta; se coloca la tapa y se inserta el termómetro a través del orificio central de la misma.
- Se agita la muestra continuamente con el termómetro, dándole a éste un movimiento circular y evitando movimientos verticales que pudieran provocar la formación de burbujas, teniendo cuidado de no golpear el fondo del tubo de viscosidad para no presionar la emulsión a través del orificio de la boquilla; se ajusta la temperatura del baño hasta que la muestra alcance la temperatura de prueba y se establezca el equilibrio térmico.
- Cuando la temperatura de la muestra permanezca constante durante 1 min de agitado continuo, con una discrepancia no mayor de $0,1^{\circ}\text{C}$ respecto a la temperatura de prueba, se retira la tapa para verificar que la muestra dentro de la cazoleta no llegue al nivel de derrame y se vuelve a colocar la tapa.



FIGURA 14.- COLOCACIÓN DE EMULSIÓN EN VISCOSÍMETRO (FOTO E. SALINAS R., 2019)



- Inmediatamente después se coloca el matraz debajo del tubo de viscosidad, se retira el tapón de corcho y simultáneamente se pone en marcha el cronómetro, el cual se detiene en el momento en que la muestra alcance la marca de aforo de 60 cm³ del matraz y se registra el tiempo medido. El lapso desde que se inicia el llenado del tubo de viscosidad hasta que empiece el llenado del matraz no debe ser mayor de 15 min.



FIGURA 15.- LLENADO DE MATRAZ CON EMULSIÓN (FOTO E. SALINAS R., 2019)

CALCULOS Y RESULTADOS:

Se reporta como viscosidad Saybolt-Furol de la muestra, el tiempo en segundos que tarda en llenarse el matraz con el material asfáltico hasta la marca de aforo, indicando también la temperatura de prueba. (M-MMP-4-05-004-00, 2000)

Resultado: **26.16 segundos a 50 °C**

De acuerdo a los parámetros que indica la norma N-CMT-4-05-001-06 para la viscosidad a 50 °C, el valor mínimo es de 25 segundos por lo que el valor obtenido de la emulsión para esta prueba **cumple**.

4.1.4.- Carga Eléctrica de las Partículas de Emulsiones Asfálticas

OBJETIVO:

Esta prueba permite determinar la polaridad eléctrica de los glóbulos de asfalto en las emulsiones, con el propósito de identificarlas como aniónicas cuando los glóbulos tienen una carga eléctrica negativa y como catiónicas cuando su carga es positiva. El procedimiento consiste en inducir una corriente eléctrica a través de la emulsión, mediante dos electrodos y observar a cuál de ellos son atraídos los glóbulos de asfalto.

EQUIPO:

El equipo para la ejecución de la prueba debe estar en condiciones óptimas para su uso, calibrado, limpio, completo en todas sus partes y sin desgaste.

El equipo necesario es el siguiente:



- **FUENTE DE PODER:**

Que proporcione una corriente eléctrica directa de 12 V, mediante un circuito eléctrico, provisto de una resistencia variable y un miliamperímetro.

- **ELECTRODOS:**

Dos electrodos, formados cada uno por una placa de acero inoxidable de aproximadamente 100 mm de longitud, 25 mm de ancho y 3 mm de espesor, aislados entre sí y sostenidos rígida y paralelamente, distando 13 mm uno del otro.

- **VASO DE PRECIPITADO:**

De vidrio y de 150 a 250 cm³ de capacidad.

- **CRONÓMETRO:**

Con aproximación de 0,2 s.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:

De la muestra de emulsión asfáltica, obtenida según se establece en el Manual M-MMP-4-05-001 *Muestreo de Materiales Asfálticos*, previamente homogeneizada en su envase mediante una agitación moderada con una varilla de vidrio limpia, evitando el rompimiento de la emulsión, se toma en el vaso de precipitado una muestra de prueba suficiente para que los electrodos puedan sumergirse aproximadamente 25 mm dentro de ella, sin tocar el fondo del vaso.

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA:

- Se conectan a la fuente de poder los electrodos limpios y secos, que se introducen en la emulsión hasta que queden sumergidos 25 mm, sin tocar las paredes ni el fondo del vaso.
- Se conecta la fuente de poder a la corriente eléctrica y se ajusta para lograr una intensidad de 8 mA, accionando en este momento el cronómetro.



FIGURA 16.- PRUEBA CARGA ELÉCTRICA DE PARTÍCULAS (FOTO E. SALINAS R., 2019)



- Cuando hayan transcurrido 30 min de aplicación de la corriente, o bien cuando se reduzca la intensidad de la misma a 2 mA, lo que ocurra primero, se acciona el interruptor, se anota el tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba hasta que ocurra dicha reducción de intensidad, se desconectan los electrodos, se retiran de la muestra de prueba y se lavan con agua corriente.
- Después de este proceso, normalmente se habrá adherido una capa de asfalto en uno de los electrodos; de no ser así, se repiten los pasos en la misma muestra de prueba, pero aplicando mayor intensidad de corriente para lograr la adherencia, sin rebasar la capacidad máxima del miliamperímetro.



FIGURA 17.- DETERMINACIÓN DE CARGA ELÉCTRICA DE PARTÍCULAS (FOTO E. SALINAS R., 2019)

- Se observa en cuál de los electrodos se encuentra adherido el asfalto para así determinar si se trata de una emulsión asfáltica catiónica o aniónica. Las emulsiones catiónicas depositan una capa apreciable de asfalto sobre el cátodo o electrodo negativo, mientras que el ánodo o electrodo positivo se conserva relativamente limpio; lo contrario ocurre con las emulsiones aniónicas.

RESULTADOS:

Se reporta el resultado de la prueba en términos de la polaridad determinada a los glóbulos de asfalto de la emulsión; como Catiónica (+) si el asfalto se ha depositado en el cátodo o como Aniónica (-) si las partículas quedan adheridas en el ánodo. Cuando para realizar la prueba se utilice una intensidad de corriente mayor de 8 mA, ésta deberá ser anotada en el reporte de resultados. (M-MMP-4-05-017-00, 2000)

Resultado: Catiónica

Al observar que los glóbulos de asfalto se adhirieron en el electrodo negativo, se determina la emulsión como catiónica, **cumpliendo** este parámetro.



4.2.- PRUEBAS A MATERIALES PÉTREOS:

Material de prueba para caso práctico: agregado pétreo volcánico

Ubicación del banco de materiales “Cerritos”

El banco que se eligió para su estudio se encuentra en la ciudad de Morelia en el Estado de Michoacán y se le conoce con el nombre de “Cerritos”, del cual se obtuvo las características del material para saber si cumple con la normativa de la SCT vigente.

El banco de materiales se encuentra en la carretera Morelia – Joyitas, a 4 km. Del entronque Michoacán los Cerritos – Huaniqueo de Morales, con un tiempo estimado del Laboratorio de Materiales “Luis Silva Ruelas” al lugar de 25 minutos.

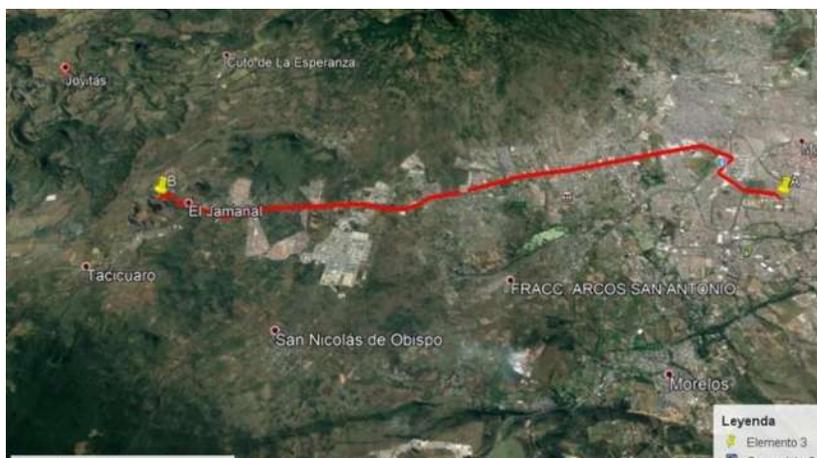


FIGURA 18. - MACROLOCALIZACIÓN DEL BANCO DE MATERIALES “CERRITOS” (GOOGLE EARTH, 2019)

El banco se encuentra en la latitud $19^{\circ}41'16.96''N$ y longitud $101^{\circ}21'0.41''O$, a una altura sobre el nivel del mar de 2160 m.



FIGURA 19. - MICROLOCALIZACIÓN DEL BANCO DE MATERIALES “CERRITOS” (GOOGLE EARTH, 2019)



4.2.1.- Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

OBJETIVO DE LA PRUEBA:

Esta prueba permite determinar la composición por tamaños (granulometría) de las partículas del material pétreo empleado en mezclas asfálticas, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas. El paso del material se hace primero a través de las mallas con la abertura más grande, hasta llegar a las más cerradas, de tal forma que los tamaños mayores se van reteniendo, para así poder obtener la masa que se retiene en cada malla, calcular su porcentaje respecto al total y definir la masa que pasa.

EQUIPO:

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes.

- **JUEGO DE MALLAS (CRIBAS):**

Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura. El tejido estará sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 \square 2 mm de diámetro interior y 68 \square 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor. Para cribar las gravas también se podrán utilizar mallas con marco de 400 mm o más por lado, a fin de facilitar la operación.

TABLA 7.- JUEGOS DE MALLAS PARA GRAVA (M-MMP-4-04-002-02, 2002)

Designación	Abertura mm
2"	50
1½"	37,5
1¼"	31,5
1"	25
¾"	19
½"	12,5
⅜"	9,5
¼"	6,3
Nº4	4,75



TABLA 8.- JUEGOS DE MALLAS PARA ARENA CON FINOS (M-MMP-4-04-002-02, 2002)

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

- **HORNO:**

Eléctrico o de gas, con capacidad mínima de 20 dm³, ventilado, con termostato capaz de mantener una temperatura constante de 110 ± 5°C.

- **BALANZA**

Con capacidad de 2 kg y aproximación de 0,1 g.

- **VASO DE ALUMINIO:**

De 500 cm³ de capacidad.

- **AGITADOR DE VARILLA METÁLICA:**

De 6,3 mm (1/4”) de diámetro y 20 cm de longitud.

- **CUBO DE LÁMINA:**

De 10 dm³ de capacidad.

- **MÁQUINA AGITADORA PARA LAS MALLAS:**

De acción mecánica, activada por un motor eléctrico o manivela de velocidad constante, mediante el cual se transmita un movimiento excéntrico controlado a un plato de soporte, sobre el que se sujeten las mallas en orden descendente.

- **CUCHARÓN:**

De acero galvanizado de 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un cajón rectangular con cuatro caras, cuya cara menor tenga un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.

- **CHAROLAS:**

De lámina galvanizada, tres con forma rectangular de aproximadamente 40 x 70 x 20 cm y dos de forma circular de 206 ± 2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, para acoplarse al bastidor de las mallas.

- **TAPAS PARA LAS CHAROLAS:**

De forma circular, que embonen perfectamente con el bastidor de las mallas.



- **REGLA:**

De madera, de 20 cm de ancho y 80 cm de longitud.

- **BROCHA:**

Con las dimensiones y cerdas adecuadas para desprender el material que se adhiera al interior del cubo de lámina y las mallas.

- **PALA:**

De acero, de forma cuadrada.

- **HILO DE CÁÑAMO:**

Resistente, de aproximadamente 40 cm de largo.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:

La preparación de la muestra de materiales pétreos, obtenida según se establece en el Manual M-MMP-4-04-001, *Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, se hace de la siguiente manera:

SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA LA PRUEBA:

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

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

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

Con ayuda de la regla se divide el cono truncado en cuatro partes iguales, de las cuales se toman dos cuartos opuestos para llenar el cubo de lámina previamente limpiado, dejando caer el material en su interior desde una altura de 20 cm. Una vez lleno el cubo se enrasa con el hilo de cáñamo.



FIGURA 20.- CUARTEO DE MUESTRA (FOTO E. SALINAS R., 2019)

En caso de exceder el volumen requerido para llenar el cubo, se procede a reducir la cantidad de material mediante cuarteos sucesivos.

OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS DE PRUEBA:

Para realizar la prueba, de la muestra contenida en el cubo de 10 dm^3 se separa la grava de la arena con finos, conforme al siguiente procedimiento:

Se vacía poco a poco y cuidadosamente el material sobre la malla N°4 (4,75 mm), sin sobrepasar la capacidad de la malla y recolectando el material que pasa en una charola. Utilizando la brocha, se retiran todas las partículas que se hubieran adherido a las paredes y al fondo del cubo metálico y a la malla para hacerlas pasar también por dicha malla a fin de no perder ninguna porción del material. Finalmente, se coloca la porción de material retenido en la malla N°4 en otra charola.

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

Posteriormente, cada fracción de la muestra se trata de forma distinta, de acuerdo con lo siguiente:

- **PARA LA GRAVA:**

Se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, registrándola como W_{MG} , en g.

Para la arena con finos

Se seca al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, registrándola como W_{MSF} , en g.

Del material seco se separan aproximadamente 500 g, los cuales se reducen por cuarteos, hasta obtener una masa de 200 g. Este material se coloca en el vaso



metálico donde se le agregan 500 cm³ de agua, dejándolo reposar por un tiempo de 12 h.

Hecho lo anterior, se lava el material decantando el vaso, para lo cual se agita su contenido en forma de “ochos” utilizando la varilla metálica, a la vez que se vierte sobre la malla N°200 (0,075 mm). Para facilitar el paso y eliminación de los finos, se aplica un chorro de agua con baja presión sobre el contenido de la malla, repitiendo esta operación hasta que el agua salga limpia.

Finalmente se regresa el material retenido en la malla N°200 al vaso metálico y se seca en el horno a una temperatura de 110 ± 5°C hasta masa constante, la cual se registra como W_F , en g.

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA:

PREPARACIÓN DE LAS MALLAS:

Conforme a lo establecido en la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas* y dependiendo del tipo de mezcla asfáltica donde se emplearán los materiales pétreos, se determina cuáles son las mallas por usar durante el cribado. Dichas mallas se preparan en dos juegos, el primero para la grava y el segundo para la arena, ensamblándolas en orden descendente de aberturas, terminando en el fondo con la charola receptora.

CRIBADO:

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

AGITACIÓN CON EQUIPO MECÁNICO:

Se colocan las mallas debidamente sujetadas en el agitador mecánico, haciéndolo funcionar durante un tiempo suficiente, determinado por experiencia o por comprobación.

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



AGITACIÓN DE FORMA MANUAL:

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

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

AGITACIÓN DE FORMA MANUAL PARA MUESTRAS COMPUESTAS PRINCIPALMENTE POR GRAVA:

Para el caso particular de gravas de tamaño nominal entre 31,5 mm a 50 mm (1¼” a 2”) y de difícil manejo, se requerirían juegos de mallas y agitador de tamaño adecuado, los cuales no siempre están disponibles, por lo que se permitirá el empleo del método descrito a continuación:

Se trabaja individualmente cada malla usando tres charolas rectangulares, procediendo de la siguiente forma:

Se coloca en la primera charola la muestra seca, a la que previamente se le ha determinado su masa.

Dentro de la segunda charola se pone la malla de mayor tamaño y con el cucharón se colocan porciones de la muestra, en cantidad tal que no cubran la malla con más de una capa de partículas. Se agita la malla con ambas manos y se verifica que todas las partículas tengan movimiento sobre ésta.

Cuando ya no pase material, el retenido en la malla se coloca en la tercera charola, continuando con la siguiente porción de la misma manera, haciéndolo consecutivamente hasta cribar toda la muestra.

Se determina en la balanza y se registra, la masa retenida en la malla, con lo que se libera la tercera charola, que pasa a ser la segunda para el siguiente proceso, con la malla subsecuente.

Sucesivamente se aplica el mismo procedimiento con las mallas siguientes, depositando el material que pasa en la segunda charola y el retenido en la tercera, concluyendo al llegar a la malla N°4 donde se determina y registra la masa del material que pasó esta última malla.

VERIFICACIÓN DE LA PRUEBA:

Para comprobar que el cribado se haya ejecutado en forma correcta, debe observarse para cada malla, que durante un minuto extra de cribado continuo no



pase más del 1% de la masa del material retenido. Esto se hace de la siguiente manera:

Una vez separadas las mallas se manejan en forma individual, colocándoles sucesivamente una charola y una tapa bien ajustadas en cada uno de sus extremos se coloca la malla en turno con su tapa y charola en posición ligeramente inclinada sobre una superficie rígida, se balancea con rapidez de un lado a otro, dando un ligero golpe con la mano aproximadamente a cada sexto de vuelta hasta completar 25 golpes.

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

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

CÁLCULOS Y RESULTADOS

Se calculan y reportan los porcentajes respecto a la masa de la muestra original, correspondientes al material retenido en la malla N°4 y al material que pasa dicha malla. (M-MMP-4-04-002-02, 2002)

TABLA 9.- GRANULOMETRÍA GRAVA (E. SALINAS R., 2019)

MALLA	MASA RETENIDA(KG)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	600	5.58	5.58	94.42
3/4"	2730	25.41	30.99	69.01
1/2"	5420	50.44	81.43	18.57
3/8"	1520	14.15	95.58	4.42
1/4"	210	1.95	97.53	2.47
No. 4	15	0.14	97.67	2.33
pasa No. 4	250	2.33	100.00	0.00



TABLA 10.- GRANULOMETRIA SELLO (E. SALINAS R., 2019)

MALLA	MASA RETENIDA(G)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1/2"	39	1.19	1.19	98.81
3/8"	435	13.23	14.42	85.58
1/4"	1279	38.90	53.32	46.68
No. 4	879	26.73	80.05	19.95
PASA No. 4	656	19.95	100.00	0.00

Tabla 11.- GRANULOMETRIA ARENA

MALLA	MASA RETENIDA(KG)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
No. 4	0.011	2.20	2.20	97.80
# 10	0.152	30.46	32.67	67.33
# 20	0.189	37.88	70.54	29.46
# 40	0.082	16.43	86.97	13.03
# 60	0.025	5.01	91.98	8.02
# 100	0.016	3.21	95.19	4.81
# 200	0.013	2.61	97.80	2.20
PASA 200	0.011	2.20	100.00	0.00

Después de conocer las granulometrías de los materiales con los cuales se trabajará se optó por realizar 4 tanteos para obtener la curva granulométrica óptima los cuales se describirán en temas más adelante.

4.2.2.- Densidades Relativas y Absorción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

OBJETIVO DE LA PRUEBA:

Estas pruebas permiten determinar las densidades relativas de los materiales pétreos, es decir, sus relaciones masa-volumen respecto a la relación masa-volumen del agua, así como la absorción de los materiales pétreos, propiedades que se utilizan para calcular los volúmenes ocupados por los materiales en la mezcla asfáltica; las densidades relativas se determinan mediante dos pruebas, una para la fracción del material pétreo retenida en la malla N°4 (4,75 mm) y otra para la que pasa dicha malla.

EQUIPO Y MATERIALES:



El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad, considerando siempre la fecha de su caducidad.

- **BALANZAS:**

Una con capacidad de 5 kg y aproximación de 0,5 g y otra con capacidad de 1 kg y aproximación de 0,01 g.

- **CANASTILLA:**

Recipiente de malla metálica con abertura de 3,35 mm (N°6) ó 2,36 mm (N°8), de aproximadamente 20 cm de diámetro y 20 cm de altura o recipiente metálico o de plástico de 4 a 7 L de capacidad, para material pétreo de tamaño máximo hasta de 37,5 mm (1½ in). Para tamaño máximo mayor del material pétreo la canastilla puede ser más grande.

- **TANQUE DE AGUA:**

Con capacidad suficiente para contener la canastilla con la porción de prueba mientras está suspendida debajo de la balanza.

- **RECIPIENTE:**

Adecuado para saturar el material.

- **HORNO:**

Con capacidad suficiente para contener la porción de prueba de la muestra, ventilado, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

- **MATRACES:**

Aforado, de cuello largo y fondo plano, de 500 cm³ de capacidad u otro frasco o recipiente con volumen mayor al 50% del espacio requerido al agregar en él la porción de prueba del material que pasó la malla N°4 (4,75 mm).

Del tipo Le Chatelier con capacidad para una muestra de material que pase la malla N°4 (4,75 mm), de aproximadamente 55 g.

- **FUENTE DE CALOR:**

Parrilla eléctrica u otra fuente de calor.

- **MALLA DEL N°4:**

Con abertura de 4,75 mm, fabricada con alambre de bronce o de acero inoxidable, tejido en forma de cuadrícula. El tejido estará sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ± 2 mm de diámetro interior y



68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.

- **LIENZO:**

De material absorbente, de 60 x 60 cm.

- **TERMÓMETRO:**

Calibrado, con un rango de 0 a 50°C y aproximación de 0,1°C.

- **TRAMPA DE VACÍO O DISPOSITIVO NEUMÁTICO DE SUCCIÓN:**

Capaz de producir un vacío máximo correspondiente a 100 mm de Hg, (0,136 kg/cm²).

- **AGITADOR:**

De vidrio, de forma cilíndrica.

- **EMBUDO:**

De vidrio o de plástico.

- **CUCHARÓN:**

De lámina, de 300 cm³ de capacidad.

- **CHAROLAS:**

De lámina galvanizada, con forma rectangular de aproximadamente 70 × 40 × 20 cm.

- **MOLDE DE LATÓN O ACERO INOXIDABLE:**

En forma de cono truncado de 40 ± 3 mm de diámetro en la base superior, 90 ± 3 mm de diámetro en la inferior y 75 ± 3 mm de altura. El espesor de la lámina será de 0,9 mm como mínimo.

- **PISÓN METÁLICO:**

Con masa de 340 ± 15 g, con los extremos planos y de un diámetro de 25 ± 3 mm.

- **ESPÁTULA:**

Con las dimensiones adecuadas para mezclar el material pétreo.

- **CUENTAGOTAS O PIPETA:**

De vidrio o metal.

- **DESECADOR DE VIDRIO:**



Con capacidad suficiente para contener las muestras de prueba.

- **AGUA:**

Destilada.

- **ALCOHOL:**

De uso etílico de grado industrial.

- **ÉTER SULFÚRICO:**

Para lavar el matraz, grado reactivo.

- **BICROMATO DE POTASIO:**

Para preparar una mezcla crómica para el lavado del matraz, grado analítico.

- **ÁCIDO SULFÚRICO:**

De uso comercial, grado reactivo.

- **ALCOHOL ISOPROPÍLICO:**

De uso comercial, grado industrial.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:

La preparación de la muestra de materiales pétreos, obtenida según se establece en el Manual M-MMP-4-04-001, *Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, se hace de la siguiente manera:

PREPARACIÓN:

La muestra del material recibida en el laboratorio se trata y separa mediante cribado en dos fracciones: el material que se retiene en la malla N°4 (4,75 mm) y el que pasa por dicha malla, colocando las fracciones en charolas distintas.

OBTENCIÓN DE LAS PORCIONES DE PRUEBA:

- **Material que se retiene en la malla N°4**

De la fracción de material que se retiene en la malla N°4 (4,75 mm) a que se refiere la Fracción anterior, se separa por cuarteo una porción de material pétreo.

- **Material que pasa la malla N°4**

De la fracción de material que pasa por la malla N°4, se separa por cuarteo una porción de prueba de aproximadamente 1 kg.



PROCEDIMIENTOS DE LAS PRUEBAS PARA EL MATERIAL QUE PASA LA MALLA N°4

Las densidades del material que pasa la malla N°4 se pueden obtener mediante el procedimiento gravimétrico o el procedimiento volumétrico como se indica a continuación:

SATURACIÓN DE PORCIÓN DE PRUEBA:

La porción de prueba se satura hasta la condición de saturada parcialmente seca de la siguiente manera:

Aplicando presión en forma manual se disgregan los grumos de la porción de prueba hasta obtener un material homogéneo, teniendo el cuidado necesario para no romper las partículas durante esta operación.

Se procede a secar la porción de prueba en el horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante, que representa la masa seca del material y se registra como *WS*, en g. Se deja enfriar a temperatura ambiente hasta que se pueda manipular.

Se sumerge el material en un recipiente con agua limpia a una temperatura de 15 a 25°C y se mantiene en estas condiciones durante 24 ± 4 h.

Se decanta el agua evitando la pérdida de finos, se extiende el material sobre una superficie plana no absorbente y se aplica una corriente de aire a la vez que se mueve en forma continua para asegurar un secado uniforme hasta que no haya agua visible en la superficie del material y las partículas se noten húmedas sin película brillante visible de agua.

Se coloca el molde cónico sobre una superficie plana apoyándolo en su base de mayor diámetro y se llena con el material parcialmente seco a que se refiere el Inciso anterior, se le aplican 25 golpes suaves con el pisón y se levanta verticalmente el molde. Si el material contiene agua superficial mantendrá la forma cónica; en este caso, se continúa la operación de secado, repitiendo frecuentemente el procedimiento del cono antes descrito, hasta que al levantar éste, el material no mantenga la forma cónica, lo que indicará que no existe agua superficial. Si al efectuar la prueba por primera vez, el material no mantiene la forma cónica, se le agrega un poco de agua, se mezcla perfectamente y se deja en reposo en un recipiente cubierto, durante un tiempo mínimo de 30 min, para después repetir la operación de secado que se indica en este Inciso.

PROCEDIMIENTO GRAVIMÉTRICO:

Calibración del matraz de cuello largo y fondo plano:

Previamente al inicio de la prueba, se calibra el matraz de cuello largo y fondo plano por emplear para el material que pasa la malla N°4, como sigue:



Se lava el matraz con la mezcla crómica para eliminar la grasa adherida en su interior. La mezcla crómica para lavado se obtiene disolviendo en caliente 60 g de bicromato de potasio en 300 cm³ de agua destilada, a la cual se le adicionan en frío 450 cm³ de ácido sulfúrico comercial.

Se enjuaga el matraz con agua destilada y se escurre perfectamente, bañando a continuación su pared interior con alcohol para eliminar los residuos de agua.

Para finalizar el lavado se enjuaga nuevamente el matraz con éter sulfúrico y con objeto de facilitar su eliminación, se coloca el matraz en un soporte con la boca libre hacia abajo, durante 10 min.

Se determina la masa del matraz seco y limpio, y se registra como W_f , en g.

Con agua destilada, que se encuentre a la temperatura ambiente, se llena el matraz hasta aproximadamente 0,5 cm abajo de la marca de aforo, dejándola reposar durante unos minutos.

Se verifica que la temperatura del agua dentro del matraz sea uniforme, para lo cual se toman lecturas con el termómetro a diferentes profundidades. Si la temperatura no es uniforme y la diferencia es menor de 0,2°, se agita suavemente el agua con el termómetro, pero si la diferencia de temperaturas es mayor de 0,2°C, se tapa el matraz con la palma de la mano y se voltea lentamente procurando evitar la formación de burbujas; finalmente se mide la temperatura del agua colocando el bulbo del termómetro en el centro del matraz y se registra dicha temperatura como t_0 , en °C.

Utilizando el cuentagotas o pipeta, se agrega agua destilada hasta que la parte inferior del menisco del líquido coincida con la marca de aforo.

Posteriormente, sin tocar o alterar dicho menisco se seca cuidadosamente el interior del cuello del matraz con el lienzo absorbente enrollado y se determina la masa del matraz lleno de agua, registrándola como P_0 , en g.

Siguiendo las indicaciones, se efectúan otras cuatro determinaciones de la masa P del matraz lleno de agua, a las temperaturas de 5 y 10°C por abajo y 5 y 10°C por arriba, aproximadamente, de la temperatura inicial del agua (t_0), registrando las masas como $P-5$, $P-10$, P_5 y P_{10} y las temperaturas como $t-5$, $t-10$, t_5 y t_{10} , respectivamente.

Finalmente, sobre un sistema de ejes coordenados, se dibuja una curva de calibración para el matraz de prueba, marcando las temperaturas en las abscisas y las masas en las ordenadas, y se traza una curva suave y continua. (M-MMP-4-04-003-18, 2018)



CÁLCULOS Y RESULTADOS:

- **DENSIDAD Y ABSORCIÓN EN GRAVA:**

DATOS DENSIDAD:

Masa: 300 gr.

Volumen: 160 ml.

$$Densidad = \frac{Masa}{Volumen} = \frac{300 \text{ gr.}}{160 \text{ ml.}} = 1.88 \frac{\text{gr.}}{\text{ml.}} \text{ ó } \frac{\text{gr.}}{\text{cm}^3}$$

DATOS ABSORCIÓN:

Masa húmeda: 300 gr.

Masa seca: 277 gr.

$$Absorción = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 = \frac{300 - 277}{277} \times 100 = 8.30 \%$$

- **DENSIDAD Y ABSORCIÓN EN SELLO:**

DATOS DENSIDAD:

Masa: 300 gr.

Volumen: 149 ml.

$$Densidad = \frac{Masa}{Volumen} = \frac{300 \text{ gr.}}{149 \text{ ml.}} = 2.01 \frac{\text{gr.}}{\text{ml.}} \text{ ó } \frac{\text{gr.}}{\text{cm}^3}$$

DATOS ABSORCIÓN:

Masa húmeda: 300 gr

Masa seca: 285 gr.

$$Absorción = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 = \frac{300 - 285}{285} \times 100 = 5.26 \%$$

- **DENSIDAD Y ABSORCIÓN EN ARENA:**

DATOS DENSIDAD:



As: 200 gr.

K: 866 gr.

Vf: 450 ml.

F: 304 gr.

$$\begin{aligned} \text{Densidad} &= \frac{As}{Vf - (K - F - As)} = \frac{200}{450 - (866 - 304 - 200)} \\ &= 2.27 \text{ gr./ml. } \acute{o} \frac{\text{gr.}}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

DATOS ABSORCIÓN:

Masa húmeda: 250 gr.

Masa seca: 237 gr.

$$\text{Absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100 = \frac{250 - 237}{237} \times 100 = 5.49 \%$$

Al observar los resultados de densidad y absorción de todos los materiales, se determina que **no cumplen** de acuerdo a los parámetros que marca la norma N-CMT-4-04-17.

4.2.3.- Desgaste Mediante la Prueba de los Ángulos de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

OBJETIVO DE LA PRUEBA:

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

EQUIPO Y MATERIALES:

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad, considerando siempre la fecha de su caducidad.

- **MÁQUINA DE LOS ÁNGELES:**

Constituida por un cilindro de acero, hueco y cerrado en ambos extremos, con diámetro interior de 710 ± 5 mm y largo de 510 ± 5 mm, montado sobre dos soportes ubicados al centro de sus caras paralelas, que le permitan girar sobre su eje de



simetría en posición horizontal con una velocidad angular de 30 a 33 rpm. El cilindro tendrá una abertura que permita introducir la muestra de prueba y las esferas metálicas, con una tapa de cierre hermético diseñada con la misma curvatura del cilindro para que la superficie interior del mismo sea continua y uniforme; además tendrá en su parte interior una placa de acero removible de 2,5 cm (1”) de espesor, que se proyecte radialmente 8,9 cm (3½”) en toda la longitud del cilindro y contará con un dispositivo para registrar el número de revoluciones que dé el cilindro

- **CARGA ABRASIVA:**

Esferas de hierro fundido o acero, con un diámetro promedio de 47 mm y una masa de entre 390 y 445 g cada una.

- **JUEGO DE MALLAS (CRIBAS):**

Fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura determinada. El tejido estará sostenido mediante un bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206 ±2 mm de diámetro interior y 68 ± 2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.

TABLA 12.- JUEGO DE MALLAS (M-MMP-4-04-006-02, 2002)

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

- **HORNO:**

Eléctrico o de gas, con capacidad mínima de 20 dm³, ventilado, con termostato capaz de mantener una temperatura constante de 110 ± 5°C.

- **BALANZA:**

Con capacidad de 20 kg y aproximación de 0,1 g.

- **MÁQUINA AGITADORA PARA LAS MALLAS:**

De acción mecánica, activada por un motor eléctrico o manivela de velocidad constante, mediante el cual se transmita un movimiento excéntrico controlado a un plato de soporte, sobre el que se sujeten las mallas en orden descendente.



- **CUCHARÓN:**

De acero galvanizado de 20 cm de largo, 11 cm de ancho y 10 cm de altura, formando un cajón rectangular con cuatro caras, cuya cara menor tenga un mango metálico de sección circular de 13 cm de largo.

- **CHAROLAS:**

De lámina galvanizada, con forma rectangular de aproximadamente 40 x 70 x 20 cm.

- **AGUA:**

Potable.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:

La preparación de la muestra de materiales pétreos, obtenida según se establece en el Manual M·MMP·4·04·001, *Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, se hace de la siguiente manera:

De la muestra del material envasado que se recibe en laboratorio, se disgrega de forma manual el material que presente grumos, teniendo la precaución de no fragmentarlo por la presión aplicada. Hecho lo anterior, se *cuartea* el material hasta obtener una muestra de aproximadamente 40 kg, como se describe a continuación:

Una vez que el material está disgregado, se apila hasta formar un cono.

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

Se divide el cono truncado en cuatro partes iguales, de las cuales se toman dos cuartos opuestos para formar una muestra de aproximadamente 40 kg; en caso de exceder esta masa, se procede a reducir la cantidad de material mediante cuarteos sucesivos.

La muestra resultante se lava mediante un chorro de agua para eliminar el polvo adherido y posteriormente se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.

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

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA:

Una vez separado y clasificado el material de la muestra, de la Tabla 2 se elige el tipo de composición que se utilizará para integrar la muestra de prueba, que mejor se asemeje a las características granulométricas obtenidas.



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

TABLA 13.- COMPOSICIÓN DE LA MUESTRA DE PRUEBA Y CARGAS ABRASIVAS (M-MMP-4-04-006-02, 2002)

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37,5 - 25	1½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - ⅜"	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	⅜" - ¼"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	¼" - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

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

De acuerdo con lo indicado en la Tabla, se define la cantidad de esferas requeridas y se verifica que su masa total cumpla con lo establecido en dicha Tabla. Hecho lo anterior, se introducen las esferas a la máquina de Los Ángeles y se hace funcionar a una velocidad angular de 30 a 33 rpm, durante 500 revoluciones.

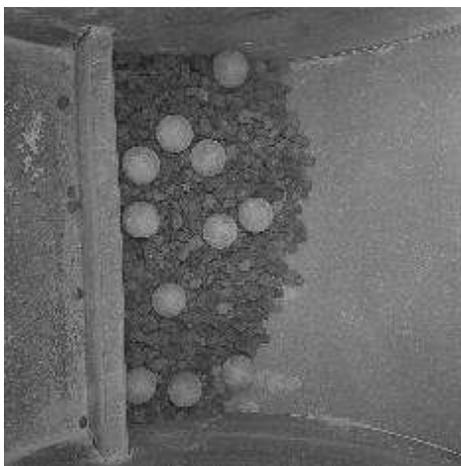


FIGURA 21.- COLOCACIÓN DE MUESTRA Y ESFERAS DENTRO DE LA MÁQUINA DE DESGASTE (E. SALINAS R., 2019)

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



indicadas en la Tabla 1 de este Manual. Una vez desechado el material menor de 1,7 mm, se lava la muestra de prueba con un chorro de agua y se seca en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante.

Finalmente se deja enfriar la muestra de prueba a temperatura ambiente, para determinar su masa con aproximación de 0,1 g, registrándola como P_f . (M-MMP-4-04-006-02, 2002)

CÁLCULOS Y RESULTADOS:

Se calcula y reporta como resultado de la prueba, el desgaste por trituración, utilizando la siguiente expresión:

$$P = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100$$

Donde:

P_a = Desgaste por trituración Los Ángeles, (%)

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

P_f = Masa final del material de la muestra de prueba mayor de 1,7 mm (malla N°12), (g)

DATOS:

P_i = 5000 gramos

P_f = 3881 gramos

$$P = \frac{5000 - 3881}{5000} \times 100 = \mathbf{22.38\%}$$

Al observar los parámetros que marca la norma N-CMT4-04-17 para esta prueba, se concluye que el material **cumple**.

4.2.4.- Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas

OBJETIVO DE LA PRUEBA:

Esta prueba permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en agitar un cilindro, que contiene una muestra del material pétreo que pasa la malla N°4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla.



EQUIPO Y MATERIALES:

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad, considerando siempre la fecha de su caducidad.

- **CILINDRO DE PRUEBA:**

De acrílico transparente, con diámetro interior de 3,15 cm (1¼”) y altura de 43 cm (17”), graduado a cada 1 mm, desde el fondo hasta una altura de 38,1 cm (15”), que permita medir los niveles de arena sedimentada y de finos suspendidos.

- **TAPÓN DE HULE:**

Que permita tapar herméticamente al cilindro descrito en la Fracción anterior, a fin de evitar la pérdida de materiales o de solución.

- **TUBO IRRIGADOR:**

Que conste de una tubería de cobre o latón, con diámetro exterior de 0,63 cm (¼”), con uno de sus extremos cerrado formando una punta en forma de cuña. Contará con dos perforaciones laterales hechas con una broca N°60, en los lados planos de la cuña, cerca de la punta.

- **BOTELLA:**

Con capacidad aproximada de 4 L, con equipo sifón consistente en un tapón con dos orificios y un tubo de cobre doblado, como el que se muestra en la Figura.

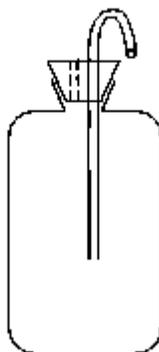


FIGURA 22.- BOTELLA CON SIFÓN (M-MMP-4-04-004-02, 2002)



- **SOPORTE O DISPOSITIVO DE POSICIONAMIENTO:**

Que permita ubicar la botella y todo el dispositivo del sifón a la altura y de la forma indicada.

- **MANGUERA DE HULE:**

Para conectar el sifón al tubo irrigador. De 0,48 cm ($3/16$ ") de diámetro, con una pinza para obturarla.

- **PISÓN:**

Formado por una varilla de 46 cm de longitud y 0,63 cm ($1/4$ ") de diámetro. En su extremo superior contará con un lastre suficiente para que la masa total del dispositivo sea de 1 kg y en el otro extremo tendrá una base hexagonal cónica. Tendrá un indicador del nivel de la arena en su parte media que ajuste en el interior cilindro de prueba.

- **CÁPSULA:**

Con capacidad de 90 mL.

- **EMBUDO DE BOCA ANCHA:**

Para depositar la muestra dentro del cilindro.

- **EMBUDO PARA FILTRADO:**

De vidrio, con capacidad de 375 mL, que permita vaciar los reactivos de la solución de reserva.

- **MALLA N°4:**

Fabricada con alambre de bronce o de acero inoxidable, tejido en forma de cuadrícula y con aberturas de 4,75 mm.

- **PAPEL FILTRO:**

Whatman N°12 o equivalente, de material resistente a los reactivos y soluciones que se utilizarán.

- **BALANZA:**

Con capacidad de 2 000 g y aproximación de 0,1 g.

COMPONENTES PARA ELABORAR UNA SOLUCIÓN DE RESERVA:

1. Cloruro de calcio anhidro.
2. Glicerina USP.
3. Formaldehído RA (solución volumétrica al 40%).



PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES NECESARIAS PARA LA PRUEBA:

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

SOLUCIÓN DE RESERVA:

1. Se disuelven 454 g de cloruro de calcio en 1,9 L de agua destilada.
2. Se enfría la solución al aire libre, hasta alcanzar la temperatura ambiente y después se pasa a través del papel filtro.
3. Se agregan 47 g de formaldehído y 2 047 g de glicerina, mezclándose bien y diluyéndose con agua destilada hasta completar 3,2 L de líquido.

SOLUCIÓN DE TRABAJO:

Para preparar la solución de trabajo, en la botella equipada con el equipo sifón se diluyen 90 mL de la solución de reserva en 3,8 L de agua destilada.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA:

La preparación de la muestra de materiales pétreos, obtenida según se establece en el Manual M·MMP·4·04·001, *Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, se hace de la siguiente manera:

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

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

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

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

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

Se hace pasar la muestra por la malla N°4, y si el material retenido en dicha malla presenta partículas finas adheridas, se frota entre las manos con guantes a fin de desprender y recuperar dichas partículas, las cuales se añadirán al material que pasó la malla. El material retenido en la malla se elimina.



El material que pasa la malla N°4 se disgrega y se cuartea, hasta reducirlo a una masa de aproximadamente 2 kg.

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

PREPARACIÓN DEL EQUIPO:

La botella equipada con el equipo sifón se coloca de tal manera que la salida del líquido quede a 92 cm de altura con relación a la superficie de la mesa de trabajo, uniendo la botella mediante la manguera de hule al tubo irrigador.

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA:

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

Por medio del sifón, se introduce la solución de trabajo al cilindro hasta una altura de 10 cm (4”).

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

Se deja reposar la muestra durante 10 min, se cierra el cilindro de prueba con un tapón y se agita considerando lo siguiente:

AGITADO MANUAL:

Se agita vigorosamente el cilindro colocado en posición horizontal de un lado a otro en sentido longitudinal durante 90 ciclos en un tiempo de 30 s, con una carrera aproximada de 20 cm, entendiendo que un ciclo comprende un movimiento completo de oscilación, es decir, de un lado a otro hasta concluir en la posición de partida.

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

Cuando el nivel del líquido llegue a 38,1 cm (15”), medido sobre la escala del cilindro de prueba, se extrae lentamente el tubo irrigador sin cortar el flujo de solución, de



manera que el nivel del líquido se mantenga en los 38,1 cm después de retirar completamente el tubo.

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

Se mide y registra como (LNS_{finos}) el nivel superior de los finos en suspensión, con aproximación de 2 mm (0,1” aprox.). Dicha lectura se hará en condiciones de iluminación que permitan apreciar claramente el nivel máximo de las partículas, observando el cilindro desde uno de sus lados, de tal manera que la línea de visión forme ángulo recto con la pared del cilindro.

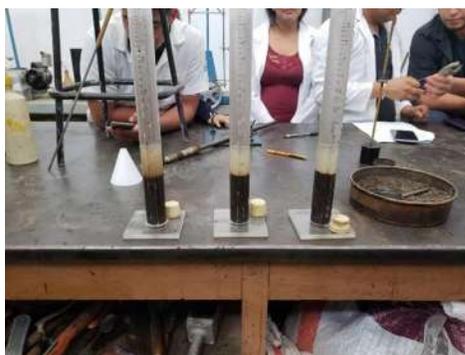


FIGURA 23.- NIVELES DE FINOS (FOTO E. SALINAS R., 2019)

A continuación, se introduce lentamente la varilla con pisón dentro del cilindro, cuidando de no formar turbulencias, hasta que la base descansa sobre la arena. Se observa el nivel de la parte superior del indicador en la escala del cilindro, se le resta la altura h (254 mm aprox.) y se registra como el nivel superior de la arena (LNS_{arena}), con aproximación de 2 mm (0,1” aprox.). Durante la medición se tendrán las mismas consideraciones citadas en la Fracción anterior.

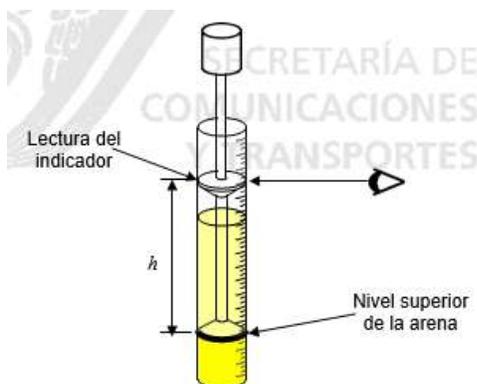


FIGURA 24.- MEDICIÓN DEL NIVEL DE ARENA (M-MMP-4-04-004-02, 2002)



FIGURA 25.- MEDICIÓN DE NIVELES DE ARENA Y FINOS (FOTO E. SALINAS R., 2019)

Una vez concluida la prueba, se limpia el cilindro, tapándolo y agitándolo en posición vertical; se voltea y se destapa para vaciarlo inmediatamente. Para finalizar se lava dos veces con agua, hasta eliminar cualquier residuo de material en su interior. (M-MMP-4-04-004-02, 2002)

CALCULOS Y RESULTADOS:

Se calcula y reporta como resultado de la prueba el equivalente de arena, utilizando la siguiente expresión:

$$\%EA = \left(\frac{LNS_{arena}}{LNS_{finos}} \right) \times 100$$

DATOS:

LNS arena: 34.8 cm

LNS finos: 14.04 cm

Distancia del pisón: 25.4 cm

LNS arenas corregida: 34.8 – 25.4= 10.6 cm

$$\% EA = \frac{10.6}{14.04} \times 100 = \mathbf{66.95\%}$$

Al comparar los resultados de la prueba con los parámetros que indica la norma N-CMT-4-04-17, se concluye que el material cumple con dicho parámetro.



5.- DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

5.1.- DISEÑO DE MEZCLA PARA ESPECÍMENES

Una vez conocidos todos los datos del material pétreo y de la emulsión asfáltica, se procede con el diseño de los especímenes para conocer el contenido óptimo de diseño.

Primeramente, conoceremos la cantidad necesaria de cada tipo de material, en este caso se optó por utilizar los materiales en porcentaje, es decir, tomando cierta cantidad del material sin haberle hecho un proceso previo de cribado, tomando de esta manera la manera convencional de preparar una mezcla ya en obra y poder así tener datos un poco más acercados de lo que se produce en obra con lo que se trabaja en laboratorio.

El total de material que utilizaremos para cada espécimen será de 4000 gr. (4.000 kg.), y en base a este peso se tendrá el material necesario de cada material.

Para conocer esto se hicieron varias pruebas de granulometría cambiando los porcentajes agregados de cada material para conformar el total de 4000 gr. (Domiguez, 2015)

Se llevaron a cabo varios tanteos de porcentajes de materiales con el fin de encontrar la distribución óptima de tamaños de los agregados pétreos y se lograra cumplir con la curva granulométrica designada para este caso

TABLA 14.- TANTEO1 (E. SALINAS R., 2019)

Granulometría Mezcla 50% Sello, 25% Grava, 25% Arena				
MALLA	MASA RETENIDA(KG)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	171	5.15	5.15	94.85
1/2"	343	10.34	15.49	84.51
3/8"	620	18.69	34.18	65.82
1/4"	930	28.03	62.21	37.79
No. 4	253	7.63	69.83	30.17
# 10	393	11.84	81.68	18.32
# 20	264	7.96	89.63	10.37
# 40	176	5.30	94.94	5.06
# 60	42	1.27	96.20	3.80
# 100	41	1.24	97.44	2.56
# 200	39	1.18	98.61	1.39
PASA 200	46	1.39	100.00	0.00

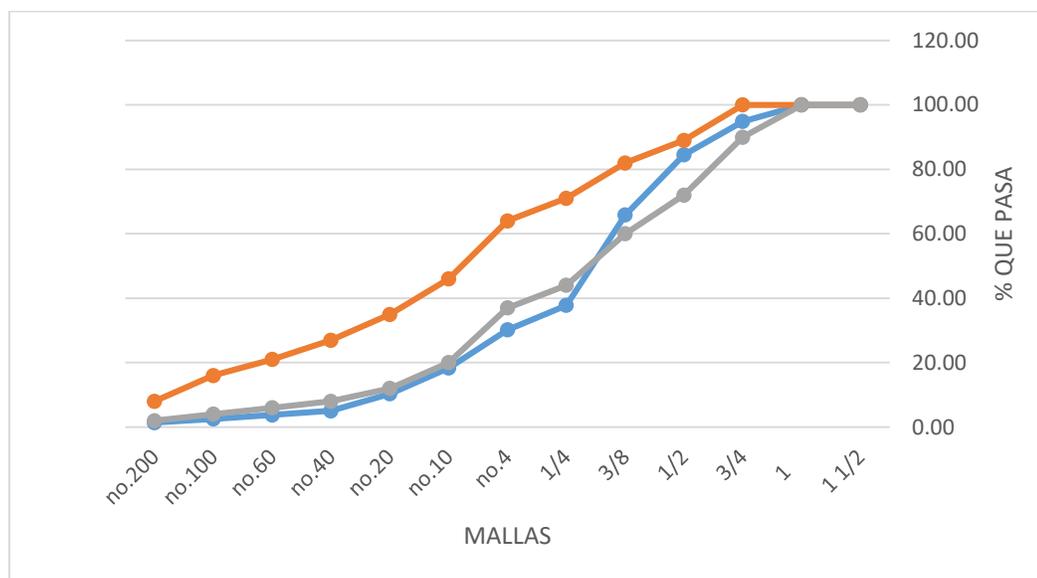


“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



TABLA 15 .- % QUE PASA DE TANTEO 1 (E. SALINAS R., 2019)

Mallas	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	1/4	no. 4	no.1 0	no.2 0	no.4 0	no.6 0	no.1 00	no.2 00
% que pasa	100	100	94.8 5	84.5 1	65.8 2	37.7 9	30.1 7	18.3 2	10.3 7	5.06	3.80	2.56	1.39
Limite	100	100	100	89	82	71	64	46	35	27	21	16	8
Limite	100	100	90	72	60	44	37	20	12	8	6	4	2



GRAFICA 1.- GRAFICA % TANTEO 1 VS. LIMITES (E. SALINAS R., 2019)

Como se observa en la gráfica, tenemos una ausencia de finos y tenemos de material de la malla #200 hasta la malla 1/4”, por lo que nos indica que debemos colocar más material denominado sello y arena para poder cumplir con los porcentajes mínimos que nos marca la norma para una mezcla densa de tamaño máximo de 3/4”, teniendo en cuenta que la arena no está bien graduada, se optó por colocar más arena y bajar el porcentaje de sello.

A continuación, se muestran los resultados del cambio de los porcentajes de los materiales.

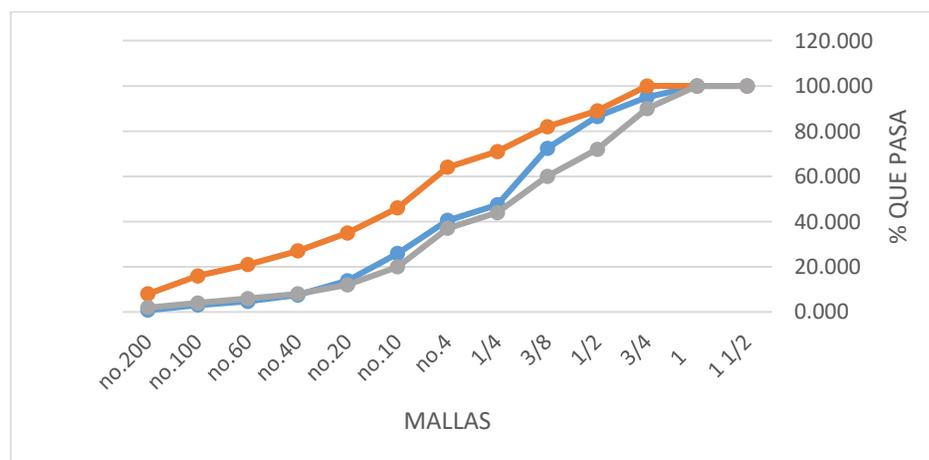


TABLA 16.- TANTEO 2 (E. SALINAS R., 2019)

Granulometría Mezcla 40% Sello, 25% Grava, 35% Arena				
MALLA	MASA RETENIDA(KG)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	186	4.88	4.88	95.12
1/2"	331	8.68	13.56	86.44
3/8"	535	14.03	27.58	72.42
1/4"	952	24.96	52.54	47.46
No. 4	264	6.92	59.47	40.53
# 10	558	14.63	74.10	25.90
# 20	460	12.06	86.16	13.84
# 40	240	6.29	92.45	7.55
# 60	107	2.81	95.25	4.75
# 100	63	1.65	96.91	3.09
# 200	86	2.25	99.16	0.84
PASA 200	32	0.84	100.00	0.00

TABLA 17.- % QUE PASA DE TANTEO 2 (E. SALINAS R., 2019)

Mallas	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	1/4	no. 4	no. 10	no. 20	no. 40	no. 60	no. 100	no. 200
% que pasa	100	100	95.123	86.44	72.41	47.45	40.53	25.90	13.84	7.5	4.7	3.09	0.83
Limite S.	100	100	100	89	82	71	64	46	35	27	21	16	8
Limite I.	100	100	90	72	60	44	37	20	12	8	6	4	2



GRAFICA 2.- % QUE PASA TANTEO 2 VS. LIMITES (E. SALINAS R., 2019)



“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



Como se observa en la gráfica, tenemos una ausencia de finos y tenemos deficiencia de material de la malla #20 hasta la malla 1/4”, por lo que nos indica que debemos colocar más material denominado sello y arena para poder cumplir con los porcentajes mínimos que nos marca la norma para una mezcla densa de tamaño máximo de 3/4”, se optó por colocar filler producto de la trituración de roca sana del tipo Basalto para que ayudara en la parte fina de las arenas ya que ahí estamos por debajo de los límites inferiores de cada malla.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del cambio en los porcentajes y la adición del filler.

TABLA 18.- TANTEO 3 (E. SALINAS R., 2019)

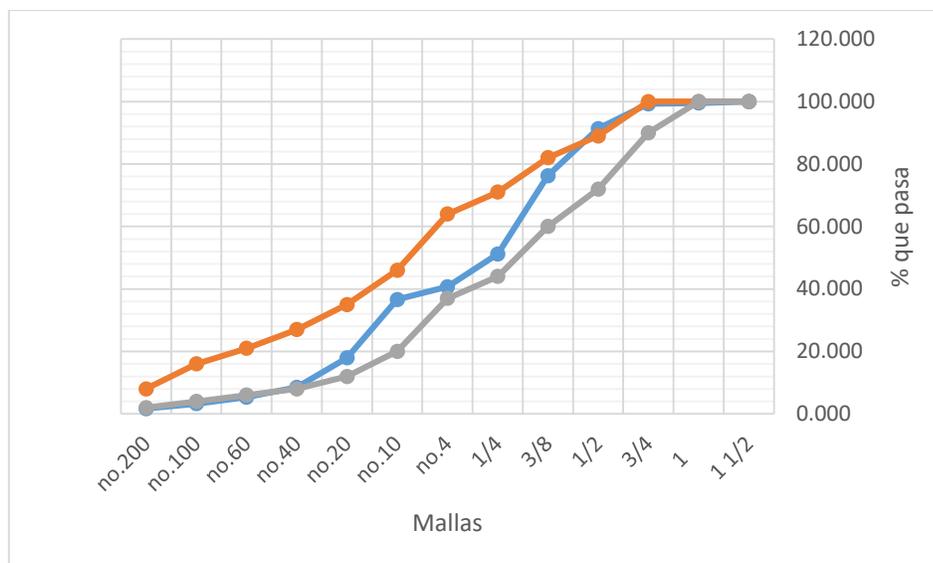
Granulometría Mezcla 45% Sello, 25% Grava, 25% Arena, 5% Filler				
MALLA	MASA RETENIDA(KG)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	17	0.44	0.44	99.56
3/4"	11	0.28	0.72	99.28
1/2"	309	7.94	8.66	91.34
3/8"	586	15.05	23.71	76.29
1/4"	977	25.10	48.81	51.19
No. 4	409	10.51	59.31	40.69
# 10	157	4.03	63.34	36.66
# 20	729	18.73	82.07	17.93
# 40	366	9.40	91.47	8.53
# 60	124	3.19	94.66	5.34
# 100	81	2.08	96.74	3.26
# 200	62	1.59	98.33	1.67
PASA 200	65	1.67	100.00	0.00

TABLA 19.- % QUE PASA DE TANTEO 3 (E. SALINAS R., 2019)

Mallas	1/2	1	3/4	1/2	3/8	1/4	no.4	no. 10	no. 20	no. 40	no. 60	no. 100	no. 200
% que pasa	100	99.5	99.2	91.3	76.2	51.1	40.68	36.65	17.93	8.53	5.34	3.26	1.67
Limite S.	100	100	100	89	82	71	64	46	35	27	21	16	8
Limite I.	100	100	90	72	60	44	37	20	12	8	6	4	2



“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



GRAFICA 3.- % QUE PASA DE TANTEO 3 VS. LIMITES (E. SALINAS R., 2019)

Como se observa en la gráfica, aún tenemos deficiencia en las mallas más finas de las arenas, teniendo en cuenta que la máxima porción de filler que se recomienda utilizar en una mezcla es del 5% entonces la siguiente acción a realizar será aumentar el porcentaje de arena de la composición.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del cambio en los porcentajes.

TABLA 20.- TANTEO 4 (E. SALINAS R., 2019)

Granulometría Mezcla 35% Sello, 25% Grava, 35% Arena, 5% Filler				
MALLA	MASA RETENIDA(G)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	142.3	3.36	3.36	96.64
1/2"	298.4	7.04	10.40	89.60
3/8"	564.1	13.31	23.71	76.29
1/4"	784.4	18.51	42.23	57.77
No. 4	313.7	7.40	49.63	50.37
# 10	543.2	12.82	62.45	37.55
# 20	634.6	14.98	77.43	22.57
# 40	417.1	9.84	87.27	12.73
# 60	163.2	3.85	91.13	8.87
# 100	123.9	2.92	94.05	5.95
# 200	100.9	2.38	96.43	3.57
PASA 200	151.2	3.57	100.00	0.00

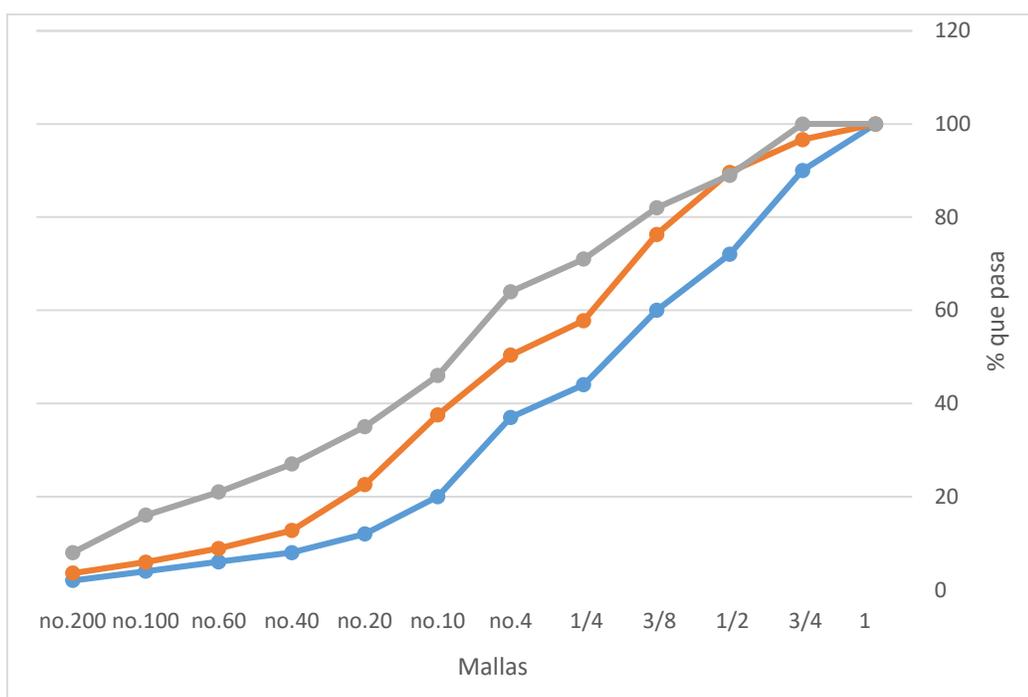


“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



TABLA 21.- % QUE PASA DE TANTEO 4 (E. SALINAS R., 2019)

Mallas	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	1/4	no. 4	no. 10	no. 20	no. 40	no. 60	no. 100	no. 200
% que pasa	100	100	96.6	89.5	76.2	57.7	50.3	37.5	22.5	12.7	8.8	5.95	3.56
Limite S.	100	100	100	89	82	71	64	46	35	27	21	16	8
Limite I.	100	100	90	72	60	44	37	20	12	8	6	4	2



GRAFICA 4.- % QUE PASA DE TANTEO 4 VS. LIMITES (E. SALINAS R., 2019)

Después de lograr la granulometría óptima, es decir, que todos los porcentajes que pasan de cada malla estén dentro de los límites que nos marca la norma, se procede a tomar la muestra de cada material de acuerdo a su porcentaje para poder obtener el material combinado necesario para elaborar los especímenes de prueba, aplicando la siguiente fórmula:

Peso total del espécimen: **4000 gr.**

Porcentaje de cada material: **25% Grava, 35% Sello, 35% Arena, 5% Filler.**

Formula:

$$\text{Cantidad de material en gramos} = \frac{\%Mat}{100} * 4000 \text{ gr.} = \text{Peso}$$



$$\text{Cantidad de material en gramos} = \frac{25\% G}{100} * 4000 \text{ gr.} = \mathbf{1000 \text{ gramos.}}$$

Esto da como resultado, que el material necesario de grava para 1 espécimen es de 1000 gramos. Esta fórmula se realiza para cada uno de los materiales restantes y se obtienen los pesos los cuales se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 22.- CANTIDADES DE MATERIAL POR ESPECÍMEN (E. SALINAS R., 2019)

Peso de material por espécimen (4000.0 gr.)		
Material	%	Cantidad necesaria en gr.
Grava	25	1000
Sello	35	1400
Arena	35	1400
Filler	5	200

Una vez finalizados los cálculos, se obtienen los pesos de cada material basándonos en la curva granulométrica que obtuvimos al inicio del diseño, esto nos indica que la proporción que tenemos de materiales pétreos cumple con los requerimientos necesarios.

Se procedió a tomar la cantidad necesaria de cada material para conformar la muestra necesaria para 1 espécimen de prueba.

Teniendo los pesos de cada material, se realizaron bolsas de plástico que contenían la cantidad necesaria de cada material, separándolos los gruesos (Grava y Sello) y los finos (Arenas y Filler), colocándolos en un espacio libre y protegido para evitar su contaminación.



FIGURA 26.- PREPARACIÓN DE BOLSAS CON CANTIDADES DE MATERIAL NECESARIAS PARA ESPECÍMENES (FOTO E. SALINAS R., 2019)



5.1.1.- Cálculo del Contenido Mínimo de Asfalto para Especímenes

Después de obtener los pesos necesarios para cada material a utilizar en el desarrollo de los especímenes, se procede a calcular el contenido mínimo de asfalto o en este caso de emulsión asfáltica con el que se elaboraran los especímenes para conocer el contenido óptimo.

Para proceder a realizar el cálculo, se tomará la granulometría óptima y con los porcentajes de materiales que pasan las diferentes mallas.

TABLA 23.- GRANULOMETRÍA ÓPTIMA (E. SALINAS R., 2019)

Granulometría Mezcla 35% Sello, 25% Grava, 35% Arena, 5% Filler				
MALLA	MASA RETENIDA(G)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	142.3	3.36	3.36	96.64
1/2"	298.4	7.04	10.40	89.60
3/8"	564.1	13.31	23.71	76.29
1/4"	784.4	18.51	42.23	57.77
No. 4	313.7	7.40	49.63	50.37
# 10	543.2	12.82	62.45	37.55
# 20	634.6	14.98	77.43	22.57
# 40	417.1	9.84	87.27	12.73
# 60	163.2	3.85	91.13	8.87
# 100	123.9	2.92	94.05	5.95
# 200	100.9	2.38	96.43	3.57
PASA 200	151.2	3.57	100.00	0.00

Con los datos de granulometría se llena una tabla que ya contiene el formato para poder obtener el contenido mínimo de asfalto.

TABLA 24.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 1/2" – 3/4"					
3/4" – No. 4					
No. 4 - 40					
40 - 200					
Pasa 200					
Suma					



“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



El primer paso es determinar el material retenido entre la malla 1 ½” y la malla ¾”, luego realizamos el mismo proceso entre las demás mallas que nos indica la tabla.

TABLA 25.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (E. SALINAS R., 2019)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 ½” – ¾”	3.36				
¾” – No. 4	46.27				
No. 4 - 40	37.64				
40 - 200	9.16				
Pasa 200	3.57				
Suma	100				

Para conocer los valores de la siguiente columna “**constante de área**”, nos apoyaremos con la siguiente tabla:

TABLA 26.- CONSTANTES DE ÁREA PARA CADA FRACCIÓN DE TAMAÑOS (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)

Pasa la malla	Se retiene en la malla	Constante de área (m ² /kg)
1 ½”	¾”	0.27
¾”	No. 4	0.41
No. 4	No. 40	2.05
No. 40	No. 200	15.38
No. 200	Pasa No. 200	53.3

Colocaremos los valores correspondientes para cada una de las graduaciones de tamaños del material, este valor nos indica cuantos metros cuadrados logramos cubrir por cada kilogramo de material correspondiente a cada graduación.

TABLA 27.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (E. SALINAS R., 2019)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 ½” – ¾”	3.36	0.27			
¾” – No. 4	46.27	0.41			
No. 4 - 40	37.64	2.05			
40 - 200	9.16	15.38			
Pasa 200	3.57	53.3			
Suma	100				



“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



Enseguida llenaremos la siguiente columna con la siguiente formula, ya que el valor que se debe introducir es el resultado de multiplicar la columna de “% en peso” por la columna “**constante de área**”:

$$superficie\ parcial = \frac{\% \text{ en peso}}{100} \times \text{constante de área}$$

Lo cual nos arroja como resultado la siguiente tabla:

TABLA 28.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (E. SALINAS R., 2019)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 ½” – ¾”	3.36	0.27	0.009068		
¾” – No. 4	46.27	0.41	0.189721		
No. 4 - 40	37.64	2.05	0.771665		
40 - 200	9.16	15.38	1.408412		
Pasa 200	3.57	53.3	1.902044		
Suma	100				

La siguiente columna se llena de con ayuda de la siguiente tabla:

TABLA 29.- ÍNDICE ASFÁLTICO DE ACUERDO A ORIGEN Y ABSORCIÓN DEL MATERIAL PÉTREO (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)

Material	Índice asfáltico
Gravas o arenas de río o materiales redondeados de baja absorción	0.0055
Gravas angulosas o redondeadas, trituradas de baja absorción	0.0060
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y rocas trituradas de media absorción	0.0070
Rocas trituradas de alta absorción	0.0080

Esta tabla nos ayuda a determinar el índice asfáltico para cada tipo de material, lo que diferencia a cada material es su absorción, al estar trabajando con material volcánico, sabemos que es un material poroso y por medio de la prueba de absorción determinamos que el material presenta una absorción alta, por ende,



tomaremos el valor de **índice asfáltico** de alta absorción, quedándonos la tabla de la siguiente manera:

TABLA 30.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (E. SALINAS R., 2019)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 ½" – ¾"	3.36	0.27	0.009068	0.0080	
¾" – No. 4	46.27	0.41	0.189721	0.0080	
No. 4 - 40	37.64	2.05	0.771665	0.0080	
40 - 200	9.16	15.38	1.408412	0.0080	
Pasa 200	3.57	53.3	1.902044	0.0080	
Suma	100				

Después procedemos a determinar el contenido mínimo de asfalto para cada tipo de material, quedando la tabla de la siguiente manera:

TABLA 31.- CALCULO DE CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (E. SALINAS R., 2019)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 ½" – ¾"	3.36	0.27	0.009068	0.0080	0.0000725
¾" – No. 4	46.27	0.41	0.189721	0.0080	0.001517764
No. 4 - 40	37.64	2.05	0.771665	0.0080	0.006173321
40 - 200	9.16	15.38	1.408412	0.0080	0.011267293
Pasa 200	3.57	53.3	1.902044	0.0080	0.015216351
Suma	100				0.034247273

Al conocer el contenido mínimo de asfalto para cada graduación del material, hacemos la sumatoria y la multiplicamos por 100 para determinar el porcentaje mínimo de asfalto con cual iniciaremos a elaborar los especímenes, dándonos como resultado el siguiente valor:

$$\% \text{ min. de asfalto} = \sum \text{ contenido minimo} \times 100$$

$$\% \text{ min. de asfalto} = 0.034247273 \times 100 = \mathbf{3.4247\%}$$

Después de conocer el contenido mínimo de asfalto por el método de la tabla, realizamos el cálculo por el método analítico, el cual consiste en determinar los % de retenido entre cada rango de mallas y un índice asfáltico que depende del tipo y absorción que tiene el material a utilizar.



5.1.2.- Cálculo del Contenido Mínimo de Asfalto por el Método Analítico para Especímenes

Para determinar el contenido mínimo de asfalto para el material pétreo que se ensayó en el laboratorio, utilizamos también el método analítico, y este fue el utilizado para determinar posteriormente cuantos litros por metro cúbico se necesitan de emulsión para el material pétreo.

$$A = 0.02 a + 0.045 b + cd$$

A = contenido mínimo de asfalto expresado como residuo y referido al peso del agregado (%)

a = % de material retenido en la malla No. 10

b = % de material que pasa la malla No. 10 y se retiene en la malla No. 200 c = % de material que pasa la malla No. 200

d = Coeficiente asfáltico que varía con las características del material

Con ayuda de la granulometría óptima del diseño, determinamos los valores de cada una de las incógnitas presentes en la fórmula:

TABLA 32.- GRANULOMETRÍA ÓPTIMA (E. SALINAS R., 2019)

Granulometría Mezcla 35% Sello, 25% Grava, 35% Arena, 5% Filler				
MALLA	MASA RETENIDA(G)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	142.3	3.36	3.36	96.64
1/2"	298.4	7.04	10.40	89.60
3/8"	564.1	13.31	23.71	76.29
1/4"	784.4	18.51	42.23	57.77
No. 4	313.7	7.40	49.63	50.37
# 10	543.2	12.82	62.45	37.55
# 20	634.6	14.98	77.43	22.57
# 40	417.1	9.84	87.27	12.73
# 60	163.2	3.85	91.13	8.87
# 100	123.9	2.92	94.05	5.95
# 200	100.9	2.38	96.43	3.57
PASA 200	151.2	3.57	100.00	0.00

Se obtienen los porcentajes como en el caso anterior, en este caso los rangos de las mallas cambian en algún caso en particular, quedando los valores de la siguiente manera:



a=	62.45
b=	33.98
c=	3.57
d=	0.35

El índice asfáltico se determinó igual que en el caso anterior, por medio de la absorción que presentó el material al ser analizado, dando como resultado absorción alta, por lo cual se determinó el valor de 0.35 de la tabla siguiente:

TABLA 33.- COEFICIENTE ASFÁLTICO SEGÚN CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)

Material	Índice asfáltico
Gravas o arenas de río o materiales redondeados de baja absorción	0.15
Gravas trituradas de baja absorción	0.20
Gravas trituradas de media absorción	0.30
Rocas trituradas de alta absorción	0.35

Se toma el valor de **rocas trituradas de alta absorción** ya que el material arrojó una absorción en conjunto de **5.63%**.

Procedemos a realizar los cálculos para obtener el valor de % mínimo de asfalto, cabe mencionar que dicha fórmula nos arroja el resultado en porcentaje, sustituimos valores en la fórmula.

$$A = 0.02 (62.45) + 0.0415 (33.98) + (3.57)(0.35) = 4.027 \%$$

5.1.3.- Cálculo de Diseño de Especímenes de Prueba con el Contenido Mínimo para Especímenes

Sabiendo que nuestros especímenes a realizar tienen un peso de 4000 gramos, procedemos a determinar los datos restantes para el diseño.

El dato faltante es la cantidad de emulsión en gramos dependiendo del porcentaje mínimo de emulsión asfáltica, así como el agua necesaria por espécimen para evitar que la emulsión rompa de manera rápida sin dar tiempo de que se cubran todas las partículas de pétreo por completo. Los valores se calculan en la siguiente tabla con la ayuda de las fórmulas que también se presentan a continuación:



TABLA 34.- CANTIDAD DE EMULSIÓN POR PORCENTAJE A UTILIZAR (E. SALINAS R., 2019)

% Contenido Mínimo	% De Emulsión	Masa espécimen (gr.)	Emulsión (gr.)	Agua (ml)	% Absorción	% Residuo
4.0	0.0615	4000.0	246.0	225.2	5.63	65.0
4.5	0.0692	4000.0	276.8	225.2	5.63	65.0
5.0	0.0769	4000.0	307.6	225.2	5.63	65.0
5.5	0.0846	4000.0	338.4	225.2	5.63	65.0
6.0	0.0923	4000.0	369.2	225.2	5.63	65.0
6.5	0.100	4000.0	400.0	225.2	5.63	65.0

- $\% \text{ de Emulsión} = \frac{\% \text{ contenido mínimo}}{\% \text{ residuo}}$
- $\text{Emulsión} = (\text{peso pastilla}) * (\% \text{ de Emulsión})$
- $\text{Agua} = (\text{Peso Espécimen}) * (\% \text{ Absorción})$

Para obtener el valor de Absorción, se utilizó la siguiente fórmula para determinar el valor de absorción general de los pétreos utilizados:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{100}{\frac{\% \text{ Grava}}{\% \text{ Abs.Grava}} + \frac{\% \text{ Sello}}{\% \text{ Abs.Sello}} + \frac{\% \text{ Arena}}{\% \text{ Abs.Arena}} + \frac{\% \text{ Filler}}{\% \text{ Abs.Filler}}}$$

5.2.- DISEÑO DE MEZCLA PARA PASTILLAS

Una vez conocidos todos los datos del material pétreo y de la emulsión asfáltica, se procede con el diseño de los especímenes para conocer el contenido óptimo de diseño.

Primeramente, conoceremos la cantidad necesaria de cada tipo de material, en este caso se optó por utilizar los materiales en porcentaje, es decir, tomando cierta cantidad del material sin haberle hecho un proceso previo de cribado, tomando de esta manera la manera convencional de preparar una mezcla ya en obra y poder así tener datos un poco más acercados de lo que se produce en obra con lo que se trabaja en laboratorio.

El total de material que utilizaremos para cada espécimen será de 1100 gr. (1.100 kg.), y n base a este peso se tendrá el material necesario de cada material.



Para conocer esto se hicieron varias pruebas de granulometría cambiando los porcentajes agregados de cada material para conformar el total de 4000 gr.

Se llevaron a cabo varios tanteos de porcentajes de materiales con el fin de encontrar la distribución óptima de tamaños de los agregados pétreos y se lograra cumplir con la curva granulométrica designada para este caso.

Como anteriormente ya se habían analizado los diferentes tanteos y se determinó que el óptimo fue el cuarto tanteo, para proseguir con el diseño de las pastillas solo se colocó el cuarto tanteo.

TABLA 35.- GRANULOMETRÍA ÓPTIMA (E. SALINAS R., 2019)

Granulometría Mezcla 35% Sello, 25% Grava, 35% Arena, 5% Filler				
MALLA	MASA RETENIDA(G)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	142.3	3.36	3.36	96.64
1/2"	298.4	7.04	10.40	89.60
3/8"	564.1	13.31	23.71	76.29
1/4"	784.4	18.51	42.23	57.77
No. 4	313.7	7.40	49.63	50.37
# 10	543.2	12.82	62.45	37.55
# 20	634.6	14.98	77.43	22.57
# 40	417.1	9.84	87.27	12.73
# 60	163.2	3.85	91.13	8.87
# 100	123.9	2.92	94.05	5.95
# 200	100.9	2.38	96.43	3.57
PASA 200	151.2	3.57	100.00	0.00

Después de lograr la granulometría óptima, se procede a tomar la muestra de cada material de acuerdo a su porcentaje para poder obtener el material combinado necesario para elaborar los especímenes de prueba, aplicando la siguiente formula:

Peso total de la pastilla: **1100 gr.**

Porcentaje de cada material: **25% Grava, 35% Sello, 35% Arena, 5% Filler.**

Formula:

$$\text{Cantidad de material en gramos} = \frac{\%Mat}{100} * 4000 \text{ gr.} = \text{Peso}$$

$$\text{Cantidad de material en gramos} = \frac{25\% G}{100} * 1100 \text{ gr.} = \mathbf{275 \text{ gramos.}}$$



Esto da como resultado, que el material necesario de grava para 1 espécimen es de 1000 gramos. Esta fórmula se realiza para cada uno de los materiales restantes y se obtienen los pesos los cuales se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 36.- CANTIDADES DE MATERIAL POR PASTILLA (E. SALINAS R., 2019)

Peso de material por espécimen (1100.0 gr.)		
Material	%	Cantidad necesaria en gr.
Grava	25	275
Sello	35	385
Arena	35	385
Filler	5	55

Una vez finalizados los cálculos, se obtienen los pesos de cada material basándonos en la curva granulométrica que obtuvimos al inicio del diseño, esto nos indica que la proporción que tenemos de materiales pétreos cumple con los requerimientos necesarios.

Se procedió a tomar la cantidad necesaria de cada material para conformar la muestra necesaria para 1 pastilla de prueba.

Teniendo los pesos de cada material, se realizaron bolsas de plástico que contenían la cantidad necesaria de cada material, separándolos los gruesos (Grava y Sello) y los finos (Arenas y Filler), colocándolos en un espacio libre y protegido para evitar su contaminación.



FIGURA 27.- ELABORACIÓN DE BOLSAS CON CANTIDAD NECESARIA PARA PASTILLAS (FOTO E. SALINAS R., 2019)



5.2.1.- Cálculo del Contenido Mínimo de Asfalto para Pastillas

Después de obtener los pesos necesarios para cada material a utilizar en el desarrollo de los especímenes, se procede a calcular el contenido mínimo de asfalto o en este caso de emulsión asfáltica con el que se elaboraran los especímenes para conocer el contenido óptimo.

Para proceder a realizar el cálculo, se tomará la granulometría óptima y con los porcentajes de materiales que pasan las diferentes mallas.

TABLA 37.- GRANULOMETRÍA OPTIMA (E. SALINAS R., 2019)

Granulometría Mezcla 35% Sello, 25% Grava, 35% Arena, 5% Filler				
MALLA	MASA RETENIDA(G)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	142.3	3.36	3.36	96.64
1/2"	298.4	7.04	10.40	89.60
3/8"	564.1	13.31	23.71	76.29
1/4"	784.4	18.51	42.23	57.77
No. 4	313.7	7.40	49.63	50.37
# 10	543.2	12.82	62.45	37.55
# 20	634.6	14.98	77.43	22.57
# 40	417.1	9.84	87.27	12.73
# 60	163.2	3.85	91.13	8.87
# 100	123.9	2.92	94.05	5.95
# 200	100.9	2.38	96.43	3.57
PASA 200	151.2	3.57	100.00	0.00

Con los datos de granulometría se llena una tabla que ya contiene el formato para poder obtener el contenido mínimo de asfalto.

TABLA 38.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 1/2" – 3/4"					
3/4" – No. 4					
No. 4 - 40					
40 - 200					
Pasa 200					
Suma					



“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



El primer paso es determinar el material retenido entre la malla 1 ½” y la malla ¾”, luego realizamos el mismo proceso entre las demás mallas que nos indica la tabla.

TABLA 39.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO (E. SALINAS R., 2019)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 ½” – ¾”	3.36				
¾” – No. 4	46.27				
No. 4 - 40	37.64				
40 - 200	9.16				
Pasa 200	3.57				
Suma	100				

Para conocer los valores de la siguiente columna “**constante de área**”, nos apoyaremos con la siguiente tabla:

TABLA 40.- CONSTANTES DE ÁREA PARA CADA FRACCIÓN DE TAMAÑOS (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)

Pasa la malla	Se retiene en la malla	Constante de área (m ² /kg)
1 ½”	¾”	0.27
¾”	No. 4	0.41
No. 4	No. 40	2.05
No. 40	No. 200	15.38
No. 200	Pasa No. 200	53.3

Colocaremos los valores correspondientes para cada una de las graduaciones de tamaños del material, este valor nos indica cuantos metros cuadrados logramos cubrir por cada kilogramo de material correspondiente a cada graduación.

TABLA 41.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO (E. SALINAS R., 2019)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 ½” – ¾”	3.36	0.27			
¾” – No. 4	46.27	0.41			
No. 4 - 40	37.64	2.05			
40 - 200	9.16	15.38			
Pasa 200	3.57	53.3			
Suma	100				



“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



Enseguida llenaremos la siguiente columna con la siguiente formula, ya que el valor que se debe introducir es el resultado de multiplicar la columna de “% en peso” por la columna “**constante de área**”:

$$superficie\ parcial = \frac{\% \text{ en peso}}{100} \times \text{constante de área}$$

Lo cual nos arroja como resultado la siguiente tabla:

TABLA 42.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO (E. SALINAS R., 2019)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 ½” – ¾”	3.36	0.27	0.009068		
¾” – No. 4	46.27	0.41	0.189721		
No. 4 - 40	37.64	2.05	0.771665		
40 - 200	9.16	15.38	1.408412		
Pasa 200	3.57	53.3	1.902044		
Suma	100				

La siguiente columna se llena de con ayuda de la siguiente tabla:

TABLA 43.- ÍNDICE ASFÁLTICO DE ACUERDO A ORIGEN Y ABSORCIÓN DEL MATERIAL PÉTREO (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)

Material	Índice asfáltico
Gravas o arenas de río o materiales redondeados de baja absorción	0.0055
Gravas angulosas o redondeadas, trituradas de baja absorción	0.0060
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y rocas trituradas de media absorción	0.0070
Rocas trituradas de alta absorción	0.0080

Esta tabla nos ayuda a determinar el índice asfáltico para cada tipo de material, lo que diferencia a cada material es su absorción, al estar trabajando con material volcánico, sabemos que es un material poroso y por medio de la prueba de absorción determinamos que el material presenta una absorción alta, por ende, tomaremos el valor de **índice asfáltico** de alta absorción, quedándonos la tabla de la siguiente manera:



“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



TABLA 44.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO (E. SALINAS R., 2019)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 ½" – ¾"	3.36	0.27	0.009068	0.0080	
¾" – No. 4	46.27	0.41	0.189721	0.0080	
No. 4 - 40	37.64	2.05	0.771665	0.0080	
40 - 200	9.16	15.38	1.408412	0.0080	
Pasa 200	3.57	53.3	1.902044	0.0080	
Suma	100				

Después procedemos a determinar el contenido mínimo de asfalto para cada tipo de material, quedando la tabla de la siguiente manera:

TABLA 45.- CÁLCULO DEL CONTENIDO MÍNIMO (E. SALINAS R., 2019)

Tamaño de material	% en peso	Constante de área (m ² /kg)	Superficie parcial (m ² /kg)	Índice asfáltico	Contenido mínimo
1 ½" – ¾"	3.36	0.27	0.009068	0.0080	0.0000725
¾" – No. 4	46.27	0.41	0.189721	0.0080	0.001517764
No. 4 - 40	37.64	2.05	0.771665	0.0080	0.006173321
40 - 200	9.16	15.38	1.408412	0.0080	0.011267293
Pasa 200	3.57	53.3	1.902044	0.0080	0.015216351
Suma	100				0.034247273

Al conocer el contenido mínimo de asfalto para cada graduación del material, hacemos la sumatoria y la multiplicamos por 100 para determinar el porcentaje mínimo de asfalto con cual iniciaremos a elaborar las pastillas, dándonos como resultado el siguiente valor:

$$\% \text{ min. de asfalto} = \sum \text{ contenido minimo} \times 100$$

$$\% \text{ min. de asfalto} = 0.034247273 \times 100 = \mathbf{3.4247\%}$$

Después de conocer el contenido mínimo de asfalto por el método de la tabla, realizamos el cálculo por el método analítico, el cual consiste en determinar los % de retenido entre cada rango de mallas y un índice asfáltico que depende del tipo y absorción que tiene el material a utilizar.



5.2.2.- Cálculo del Contenido Mínimo de Asfalto por el Método Analítico para Pastillas

Para determinar el contenido mínimo de asfalto para el material pétreo que se ensayó en el laboratorio, utilizamos también el método analítico, y este fue el utilizado para determinar posteriormente cuantos litros por metro cúbico se necesitan de emulsión para el material pétreo.

$$A = 0.02 a + 0.045 b + cd$$

A = contenido mínimo de asfalto expresado como residuo y referido al peso del agregado (%)

a = % de material retenido en la malla No. 10

b = % de material que pasa la malla No. 10 y se retiene en la malla No. 200 c = % de material que pasa la malla No. 200

d = Coeficiente asfáltico que varía con las características del material

Con ayuda de la granulometría óptima del diseño, determinamos los valores de cada una de las incógnitas presentes en la fórmula:

TABLA 46.- GRANULOMETRÍA ÓPTIMA (E. SALINAS R., 2019)

Granulometría Mezcla 35% Sello, 25% Grava, 35% Arena, 5% Filler				
MALLA	MASA RETENIDA(G)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	142.3	3.36	3.36	96.64
1/2"	298.4	7.04	10.40	89.60
3/8"	564.1	13.31	23.71	76.29
1/4"	784.4	18.51	42.23	57.77
No. 4	313.7	7.40	49.63	50.37
# 10	543.2	12.82	62.45	37.55
# 20	634.6	14.98	77.43	22.57
# 40	417.1	9.84	87.27	12.73
# 60	163.2	3.85	91.13	8.87
# 100	123.9	2.92	94.05	5.95
# 200	100.9	2.38	96.43	3.57
PASA 200	151.2	3.57	100.00	0.00



Se obtienen los porcentajes como en el caso anterior, en este caso los rangos de las mallas cambian en algún caso en particular, quedando los valores de la siguiente manera:

a=	62.45
b=	33.98
c=	3.57
d=	0.35

El índice asfáltico se determinó igual que en el caso anterior, por medio de la absorción que presentó el material al ser analizado, dando como resultado absorción alta, por lo cual se determinó el valor de 0.35 de la tabla siguiente:

TABLA 47.- COEFICIENTE ASFÁLTICO SEGÚN CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL (D) (Manual de Prácticas Semestre Par, 2018)

Material	Índice asfáltico
Gravas o arenas de río o materiales redondeados de baja absorción	0.15
Gravas trituradas de baja absorción	0.20
Gravas trituradas de media absorción	0.30
Rocas trituradas de alta absorción	0.35

Procedemos a realizar los cálculos para obtener el valor de % mínimo de asfalto, cabe mencionar que dicha fórmula nos arroja el resultado en porcentaje, sustituimos valores en la fórmula.

$$A = 0.02 (62.45) + 0.0415 (33.98) + (3.57)(0.35) = 4.027 \%$$

5.2.3.- Cálculo de Diseño de Especímenes de Prueba con el Contenido Mínimo para Pastillas

Sabiendo que nuestros especímenes a realizar tienen un peso de 1100 gramos, procedemos a determinar los datos restantes para el diseño.

El dato faltante es la cantidad de emulsión en gramos dependiendo del porcentaje mínimo de emulsión asfáltica, así como el agua necesaria por espécimen para evitar que la emulsión rompa de manera rápida sin dar tiempo de que se cubran todas las partículas de pétreo por completo. Los valores se calculan en la siguiente tabla con la ayuda de las fórmulas que también se presentan a continuación:



“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



TABLA 48.- CÁLCULO DE CANTIDAD NECESARIA POR PORCENTAJE DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (E. SALINAS R., 2019)

% Contenido Mínimo	% De Emulsión	Peso espécimen (gr.)	Emulsión (gr.)	Agua (ml)	% Absorción	% Residuo
4.0	0.0615	1100.0	67.69	225.2	5.63	65.0
4.5	0.0692	1100.0	76.15	225.2	5.63	65.0
5.0	0.0769	1100.0	84.62	225.2	5.63	65.0
5.5	0.0846	1100.0	93.08	225.2	5.63	65.0
6.0	0.0923	1100.0	101.54	225.2	5.63	65.0
6.5	0.100	1100.0	110.0	225.2	5.63	65.0
7.0	0.1077	1100.0	118.46	225.2	5.63	65.0
7.5	0.1154	1100.0	126.92	225.2	5.63	65.0
8.0	0.1231	1100.0	135.38	225.2	5.63	65.0
8.5	0.1308	1100.0	143.85	225.2	5.63	65.0

- $\% \text{ de Emulsión} = \frac{\% \text{ contenido mínimo}}{\% \text{ residuo}}$
- $\text{Emulsión} = (\text{peso pastilla}) * (\% \text{ de Emulsión})$
- $\text{Agua} = (\text{Peso Espécimen}) * (\% \text{ Absorción})$
-

Para obtener el valor de Absorción, se utilizó la siguiente fórmula para determinar el valor de absorción general de los pétreos utilizados:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{100}{\frac{\% \text{ Grava}}{\% \text{ Abs. Grava}} + \frac{\% \text{ Sello}}{\% \text{ Abs. Sello}} + \frac{\% \text{ Arena}}{\% \text{ Abs. Arena}} + \frac{\% \text{ Filler}}{\% \text{ Abs. Filler}}}$$



6.- EXPERIMENTACIÓN:

6.1.- ELABORACIÓN DE CILINDROS

6.1.1.- Objetivo:

Por medio de este proceso lograremos determinar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de diseño, el cual será utilizado para bachear. Por medio de 12 especímenes lograremos determinar dicho valor, el cual será el que tenga mejor comportamiento respecto a la prueba de compresión simple.

6.1.2.- Equipo Para la Elaboración de Especímenes

1.- Emulsión Asfáltica

La cual fue proporcionada por el Ing. Santillán para lograr el diseño

2.- Material Pétreo

El cual fue proporcionado por el Ing. Santillán, el material fue colocado y separado en bolsas conteniendo un total de 4000.0 gramos.

3.- Balanza

Con capacidad mínima de 6500 gramos y aproximación al gramo

4.- Prensa Hidráulica

Con la que cuenta el laboratorio, con la cual se probaran los especímenes.

5.- Molde Metálico

Molde cilíndrico de acero de 12.7 cm de diámetro interior y una altura de 20 cm, placa metálica de 14 x 14 cm con sujetadores laterales.

6.- Probeta Graduada

Con capacidad de 100 ml.

7.- Varilla Punta de Bala

Varilla de acero de 60 cm de largo con terminación en uno de sus extremos en forma curva.

8.- Aspensor

Con capacidad de 250 ml.

9.- Cuchara

Cuchara de albañil de 6”



10.- Charola

De lámina galvanizada, de forma rectangular de aproximadamente 40 x 70 x 20 cm y de forma circular de 20.6 cm de diámetro y 6.8 cm de alto.

11.- Aceite

En este caso será del residuo de automóvil, para evitar que se adhiera la mezcla al molde.

12.- Estopa y Gasolina

Para limpiar el equipo y en caso de derramamiento de emulsión asfáltica.

6.1.3.- Procedimiento de Elaboración de Especímenes

Teniendo todo el equipo y material antes mencionado, se comienza con el desarrollo de los especímenes.

1.- vertimos la porción gruesa de los materiales (grava y sello) en la charola rectangular y la porción fina en la charola circular, esto con la finalidad de que la porción fina no absorba en su totalidad el agua y la emulsión al momento de agregarla.

2.- Tomamos el aspersor y comenzamos a agregarle el agua a la parte gruesa del material pétreo, moviéndolo con la ayuda de la cuchara de albañil, asegurándonos de que todas las partículas estén húmedas. Después procedemos a realizar el mismo procedimiento con la parte fina, hasta lograr que esta quede completamente húmeda.



FIGURA 28.- MOJADO DE MATERIALES PARA ESPECÍMENES (FOTO E. SALINAS R., 2019)

3.- Tomamos la cantidad necesaria de emulsión asfáltica, que correspondiente al % de emulsión que debemos aplicar para cada espécimen, deberá ser pesada con anterioridad, y comenzamos a verterla sobre la parte gruesa del material pétreo, se verterá casi en su totalidad la emulsión sobre el material, dejando un poco de ella



en el recipiente, debemos de mezclar muy bien con la cuchara de albañil, esto con la finalidad de que todas las partículas del pétreo sean cubiertas en su totalidad por la emulsión asfáltica.

4.- después de que todas las partículas gruesas del pétreo estén cubiertas totalmente por la emulsión asfáltica, colocaremos la porción fina a la mezcla y la porción de emulsión que habíamos dejado en el recipiente. Nuevamente mezclamos con la cuchara hasta lograr que todas las partículas del material pétreo queden totalmente cubiertas por la emulsión.



FIGURA 29.- MEZCLADO DE MATERIALES Y EMULSIÓN (FOTO E. SALINAS R., 2019)

5.- Una vez logrado la uniformidad en la impregnación de la emulsión al pétreo, tomamos la charola que contiene la mezcla y la exponemos a los rayos directos del sol, con la finalidad de que se evapore el agua de la emulsión asfáltica, dicho fenómeno es mejor conocido como “ruptura de la emulsión”. Es de suma importancia seguir revolviendo el material con ayuda de la cuchara para asegurar que el agua se evapore de manera equitativa y asegurarnos que nos quede solo asfalto impregnado a nuestro material pétreo.



FIGURA 30.- EXPOSICIÓN DE MEZCLAS AL SOL PARA ELIMINACIÓN DE AGUA (FOTO E. SALINAS R., 2019)



6.- Para conocer el momento en que la ruptura de la emulsión se ha completado, es observando el color del material, teniendo como referente a que aún no se lleva a cabo la ruptura el color café y de referente a que ya se llevó a cabo la ruptura el color negro. Transcurrido un tiempo y después de seguir moviendo la mezcla, el color cambiara al tono negro mate, lo cual indica que el agua se ha evaporado por completo, como podemos observar en las imágenes siguientes:



FIGURA 31.- MEZCLA HÚMEDA (FOTO E. SALINAS R., 2019)



FIGURA 32.- MEZCLA SECA (FOTO E. SALINAS R., 2019)

7.- Una vez culminado el proceso de ruptura de la emulsión, tomamos la bandeja que contiene la mezcla asfáltica y la llevamos dentro del laboratorio. Una vez dentro, se toman los cilindros que nos ayudarán a dar forma a los especímenes y verificamos que estén limpios y libres de cualquier agente extraño o perjudicial a la mezcla, les colocamos una capa generosa de aceite, la cual nos ayudará como antiadherente entre las paredes del cilindro y la mezcla asfáltica, así como también colocaremos un círculo de papel en el fondo del cilindro, el cual tendrá la función de antiadherente entre la placa y la mezcla asfáltica.



8.- Se coloca el cilindro en una superficie plana y firme y se comienza con el llenado, el procedimiento de llenado debe ser en 3 capas del mismo grosor, entre cada capa se darán 25 golpes distribuidos en toda la capa con ayuda de la varilla punta de bala, para generar una compactación y acomodo del material.



FIGURA 33.- LLENADO DE CILINDRO (FOTO E. SALINAS R., 2019)

9.- Al finalizar de llenar el cilindro, colocamos otro círculo de papel encima de la mezcla y se coloca la placa de acero cilíndrica. Se debe tener especial cuidado que la placa quede centrada, de tal forma que no toque los bordes del cilindro que utilizamos de molde.



FIGURA 34.- CILINDRO PREPARADO PARA SER COMPACTADO (FOTO E. SALINAS R., 2019)

10.- Se toma el cilindro con bastante cuidado y se coloca en la prensa hidráulica cuidando que éste quede en el centro para que, al aplicar la carga, la compactación



se distribuya de manera equitativa. La presión de compactación debe ser igual a 13.0 toneladas (127.53 KN), cuidando que una vez llegada a la presión indicada mantendremos dicha presión por 5 segundos y detenemos la aplicación de la carga.



FIGURA 35.- COMPACTADO DE MEZCLA (FOTO E. SALINAS R., 2019)

11.- Se retira el cilindro de la prensa y se deja en la mesa de trabajo, se debe retirar la placa de acero que se le colocó encima de la mezcla, en caso de que se dificulte sacar dicha placa, se le pueden dar unos pequeños golpes en los costados del cilindro para que afloje un poco y logre salir la placa. Una vez retirada la placa se dejan los cilindros durante 24 horas, conteniendo la muestra dentro de ellos, para que el material tenga una buena adherencia entre sus partículas.

12.- transcurridas las 24 horas, se procede a desmoldar los especímenes, este proceso se debe hacer con mucho cuidado, nos auxiliaremos de un gato hidráulico y una estructura donde se sujetará el molde, debajo del molde se coloca el gato hidráulico y la placa de acero, esta última servirá como apoyo de la base del espécimen.



FIGURA 36.- EXTRACCIÓN DE ESPECÍMEN (FOTO E. SALINAS R., 2019)



13.- se comienza la extracción del espécimen con sumo cuidado, se debe hacer poco a poco para evitar que este se fracture o generar una anomalía que pueda afectar los resultados. El espécimen se debe sacar completamente con ayuda del gato, sabremos que el espécimen salió completamente del molde cuando podamos observar la placa de acero que utilizamos como apoyo de la base del cilindro, es ahí cuando retiramos el espécimen y se coloca en la mesa de trabajo para mantenerlos ahí por 24 horas más antes de ser probados.



FIGURA 37.- ESPECÍMEN EXPUESTO AL AMBIENTE POR 24 HORAS (FOTO E. SALINAS R., 2019)

14.- una vez transcurrido ese tiempo, se procede a probar el espécimen, previo a la prueba se debe colocar a la intemperie durante 1 hora para que este proceso simule las condiciones a la que está expuesta la carpeta. Transcurrido el tiempo se toma el espécimen, se le toman medidas de altura y diámetro para después proceder a colocarlo en la prensa y le aplicamos carga hasta que falle, se toma la lectura de la carátula y se registra.



FIGURA 38.- MEDICIÓN DE ESPECÍMEN (FOTO E. SALINAS R., 2019)



FIGURA 39.- APLICACIÓN DE CARGA A ESPECÍMEN (FOTO E. SALINAS R., 2019)



FIGURA 40.- FALLA DE ESPECÍMEN (FOTO E. SALINAS R., 2019)

Este procedimiento se llevó a cabo para cada uno de los especímenes que se realizaron y probaron para la obtención del contenido óptimo.

6.2.- ELABORACIÓN DE PASTILLAS

6.2.1.- Objetivo:

Por medio de este proceso lograremos determinar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica de diseño, el cual será utilizado para bachear. Por medio de 20 pastillas lograremos determinar dicho valor, el cual será el que tenga mejor comportamiento respecto a la prueba Marshall.

6.2.2.- Equipo Para la Elaboración de las Pastillas:

1.- Emulsión Asfáltica

La cual fue proporcionada por el Ing. Santillán para lograr el diseño

2.- Material Pétreo

El cual fue proporcionado por el Ing. Santillán, el material fue colocado y separado en bolsas conteniendo un total de 1100.0 gramos.



3.- Balanza

Con capacidad mínima de 6500 gramos y aproximación al gramo

4.- Prensa Hidráulica

Con la que cuenta el laboratorio, con la cual se probaran los especímenes.

5.- Molde Metálico

Molde cilíndrico de acero de 10.16 cm de diámetro interior y una altura de 10 cm.

6.- Probeta Graduada

Con capacidad de 100 ml.

7.- Compactador Marshall

Equipo doble que cumple con las especificaciones para poder ser utilizado en la compactación de pastillas

8.- Aspersor

Con capacidad de 250 ml.

9.- Espátula

Espátula de acero con mango de madera de 6”

10.- Charola

De lámina galvanizada de forma circular de 20.6 cm de diámetro y 6.8 cm de alto.

11.- Aceite

En este caso será del residuo de automóvil, para evitar que se adhiera la mezcla al molde.

12.- Estopa y Gasolina

Para limpiar el equipo y en caso de derramamiento de emulsión asfáltica.

6.2.3.- Procedimiento de Elaboración de Pastillas

Teniendo todo el equipo y material antes mencionado, se comienza con el desarrollo de las pastillas.

1.- vertimos la porción gruesa de los materiales (grava y sello) en una charola circular y la porción fina en otra charola, esto con la finalidad de que la porción fina no absorba en su totalidad el agua y la emulsión al momento de agregarla.

2.- Tomamos el aspersor y comenzamos a agregarle el agua a la parte gruesa del material pétreo, moviéndolo con la ayuda de la espátula, asegurándonos de que



todas las partículas estén húmedas. Después procedemos a realizar el mismo procedimiento con la parte fina, hasta lograr que esta quede completamente húmeda.



FIGURA 41.- APLICACIÓN DE AGUA A MATERIALES (FOTO E. SALINAS R., 2019)

3.-Tomamos la cantidad necesaria de emulsión asfáltica, que correspondiente al % de emulsión que debemos aplicar para cada espécimen, deberá ser pesada con anterioridad, y comenzamos a verterla sobre la parte gruesa del material pétreo, se verterá casi en su totalidad la emulsión sobre el material, dejando un poco de ella en el recipiente, debemos de mezclar muy bien con la espátula, esto con la finalidad de que todas las partículas del pétreo sean cubiertas en su totalidad por la emulsión asfáltica.



FIGURA 42.- PESADO DE CANTIDAD NECESARIA DE EMULSIÓN (FOTO E. SALINAS R., 2019)

4.- después de que todas las partículas gruesas del pétreo estén cubiertas totalmente por la emulsión asfáltica, colocaremos la porción fina a la mezcla y la



porción de emulsión que habíamos dejado en el recipiente. Nuevamente mezclamos con la espátula hasta lograr que todas las partículas del material pétreo queden totalmente cubiertas por la emulsión.



FIGURA 43.- MEZCLADO DE MATERIALES Y EMULSIÓN (FOTO E. SALINAS R., 2019)

5.- Una vez logrado la uniformidad en la impregnación de la emulsión al pétreo, tomamos la charola que contiene la mezcla y la exponemos a los rayos directos del sol, con la finalidad de que se evapore el agua de la emulsión asfáltica, dicho fenómeno es mejor conocido como “ruptura de la emulsión”. Es de suma importancia seguir revolviendo el material con ayuda de la espátula para asegurar que el agua se evapore de manera equitativa y asegurarnos que nos quede solo asfalto impregnado a nuestro material pétreo.



FIGURA 44.- ASOLEADO DE MEZCLA (FOTO E. SALINAS R., 2019)

6.- Para conocer el momento en que la ruptura de la emulsión se ha completado, es observando el color del material, teniendo como referente a que aún no se lleva a cabo la ruptura el color café y de referente a que ya se llevó a cabo la ruptura el



color negro. Transcurrido un tiempo y después de seguir moviendo la mezcla, el color cambiara al tono negro mate, lo cual indica que el agua se ha evaporado por completo, como podemos observar en las imágenes siguientes:



FIGURA 45.- MEZCLA HÚMEDA (FOTO E. SALINAS R., 2019)



FIGURA 46.- ROMPIMIENTO DE LA MEZCLA (FOTO E. SALINAS R., 2019)

7.- Una vez culminado el proceso de ruptura de la emulsión, tomamos la charola que contiene la mezcla asfáltica y la llevamos dentro del laboratorio. Una vez dentro, se toman los moldes que nos ayudarán a dar forma a las pastillas y verificamos que estén limpios y libres de cualquier agente extraño o perjudicial a la mezcla, les colocamos una capa generosa de aceite en la pared interna, la cual nos ayudará como antiadherente entre las paredes del molde y la mezcla asfáltica, así como también colocaremos un círculo de papel en el fondo del molde, el cual tendrá la función de antiadherente entre la placa y la mezcla asfáltica.



FIGURA 47.- COLOCADO DE ACEITE EN EL MOLDE (FOTO E. SALINAS R., 2019)

8.- Se coloca el molde en la base del compactador Marshall, se coloca la guía encima del molde y se vierte la mezcla dentro del molde, con ayuda de una varilla de acero le aplicamos 10 golpes distribuidos en la mezcla, con la finalidad de que esto ayude en el mejor acomodo de las partículas. Después de esto se comienza a golpear la mezcla, en este caso se golpeó 50 veces por cada cara de la pastilla, esto de acuerdo al Manual Básico de Emulsiones No. 19.



FIGURA 48.- COMPACTACIÓN DE MEZCLA (FOTO E. SALINAS R., 2019)

9.- Terminado de aplicar los golpes a la pastilla, se desmontan del compactador Marshall las pastillas y se meten al horno a una temperatura de 60 °C por 1 hora, esto con la finalidad de que la emulsión termine de fraguar, es decir, se evapore completamente el residuo de agua que pudiera tener la mezcla después de la compactación.



FIGURA 49. - SECADO DE PASTILLA EN HORNO A 60 °C (FOTO E. SALINAS R., 2019)

10.- Pasado este tiempo, se retiran las pastillas del horno y se procede a desmoldar las pastillas y a probarlas para determinar su estabilidad y flujo.



FIGURA 50.- DESMOLDE DE PASTILLAS



FIGURA 51.- PRUEBA DE PASTILLA (FOTO E. SALINAS R., 2019)

Este procedimiento se llevó a cabo para cada uno de los especímenes que se realizaron y probaron para la obtención del contenido óptimo.



7.- RESULTADOS

7.1.- RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA

7.1.1.- Producto asfáltico (emulsión)

De los componentes de la mezcla se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se compararon con los valores que nos marca la norma correspondiente para cada uno de dichos componentes.

TABLA 49.- RESULTADOS DE EMULSIÓN ASFÁLTICA (E. SALINAS R., 2019)

Resultados del estudio de la emulsión asfáltica	
Estudio:	Resultados:
Destilación	64.75%
Retenido en la malla #20	0.002
Viscosidad Saybolt-Furol	26.16 seg.
Carga Eléctrica de la partícula	Catiónica

Una vez teniendo los resultados de la emulsión a emplear, se determina que es del tipo ECM-65, de acuerdo a los resultados de destilación y carga eléctrica de la partícula. Una vez determinado esto, se comparan con los resultados que nos marca la norma para ese tipo de emulsión asfáltica.

TABLA 50 REQUISITOS DE CALIDAD PARA EMULSIONES ASFÁLTICAS CATIONICAS (N.CMT.4-05-001/06, 2006)

Características	Clasificación						
	ECR-60	ECR-65	ECR-70	ECM-65	ECL-65	ECL-60	ECS-60
De la emulsión:							
Contenido de cemento asfáltico en masa; %, mínimo	60	60	60	65	65	60	60
Viscosidad Saybolt-Furol a 25°C; s, mínimo	---	---	---	---	25	5	25
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C; s, mínimo	60	60	60	25	---	---	---
Asentamiento en 5 días; diferencia en %, máximo	5	5	5	5	5	10	5
Retenido en malla N° 20 en la prueba del tamiz; %, máximo	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Pasa malla N° 20 y se retiene en malla N° 60 en la prueba del tamiz; %, máximo	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Cubrimiento del agregado seco; %, mínimo	---	---	---	90	90	---	90
Cubrimiento del agregado húmedo; %, mínimo	---	---	---	75	75	---	75
Carga eléctrica de las partículas	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Disolvente en volumen; %, máximo	---	3	3	5	---	15	---



La norma con la cual compararemos nuestros resultados es la siguiente: N-CMT-4-05-001/06, que es la más reciente o más actualizada hasta la fecha, con el cual podremos darnos cuenta de los resultados que se podrán obtener desde antes de hacer la experimentación. Si los datos obtenidos cumplen satisfactoriamente con los marcados en la norma, sabremos entonces que serán buenos o satisfactorios los resultados de la experimentación.

Comparando los resultados obtenidos con los resultados que maneja la norma en la tabla 7 correspondiente a las emulsiones catiónicas, se observa que cumplen satisfactoriamente todas las pruebas realizadas a la emulsión asfáltica a emplear.

Ahora se analizan los resultados obtenidos del material pétreo, se comparan con la norma correspondiente para poder determinar la calidad del material pétreo que se utilizara para fabricar la mezcla.

7.1.2.- Materiales pétreos

TABLA 51.- RESULTADOS DE MATERIALES PÉTREOS (E. SALINAS R., 2019)

Resultados del estudio de los materiales pétreos	
Estudio:	Resultados:
Densidad	A= 2.27 gr/cm ³ , S= 2.01 gr/cm ³ , G= 1.88 gr/cm ³
Absorción	A= 5.49%, S= 5.08%, G= 8.11%
Desgaste de los Ángeles	G= 22.38 %, S= 15.68%
Equivalente de arena	66.37%

TABLA 52.- REQUISITOS DE CALIDAD DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA CUANDO $\square L \square 106$ (IMT, 2017)

Característica ^[1]	Valor	
GRAVA		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo	2,4	
Desgaste de Los Ángeles, %, máximo	35	
Desgaste Microdeval, %, máximo	18	
Intemperismo acelerado, %, (5 ciclos), máximo ^[2]	En sulfato de sodio	15
	En sulfato de magnesio	20
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	40	
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	90
	Dos o más caras	80
Desprendimiento por fricción, %, máximo	20	
ARENA Y FINOS		
Densidad relativa del material pétreo seco (d_{pd}), mínimo	2,4	
Angularidad, %, mínimo	40	
Equivalente de arena; %, mínimo	45	



Comparando los valores de **densidad** en los materiales pétreos analizados se observa que ninguno cumple con ese requisito, en este caso se determina que si se utilice dado que es el material con el que se cuenta y se especifica que es con el que se trabajara, pero esto ya nos da una idea de que podremos obtener resultados deficientes.

Comparando la prueba de **desgaste de los ángulos** con los resultados obtenidos, se observa que cumple satisfactoriamente el material pétreo grueso.

Comparando el valor de **equivalente de arena** que se obtuvo, se aprecia que cumple satisfactoriamente el material fino.

Al observar que el material pétreo con el que contamos cumple en la mayoría de pruebas realizadas, se opta por realizar la experimentación.

Cabe mencionar que la prueba de **partículas alargadas y lajeadas** no se realizó debido que el material pétreo volcánico viene en su gran mayoría conformado por partículas relativamente redondas, es decir, sin aristas vivas o con forma alargada, por lo que esa prueba se dio por hecho que cumplía.

Las demás pruebas mencionadas en la norma no se realizaron debido a que en el laboratorio no se cuenta con el equipo necesario para llevarlas a cabo.

De acuerdo con los resultados de la **granulometría** se realizó la integración de la muestra, obteniendo la granulometría óptima, como se indica a continuación, la cual queda dentro de los límites que nos marca la norma **N-CMT-4-04/17**

TABLA 53.- GRANULOMETRÍA OPTIMA (E. SALINAS R., 2019)

Granulometría Mezcla 35% Sello, 25% Grava, 35% Arena, 5% Filler				
MALLA	MASA RETENIDA(G)	% RETENIDO	%ACUMULADO	% QUE PASA
1"	0	0.00	0.00	100.00
3/4"	142.3	3.36	3.36	96.64
1/2"	298.4	7.04	10.40	89.60
3/8"	564.1	13.31	23.71	76.29
1/4"	784.4	18.51	42.23	57.77
No. 4	313.7	7.40	49.63	50.37
# 10	543.2	12.82	62.45	37.55
# 20	634.6	14.98	77.43	22.57
# 40	417.1	9.84	87.27	12.73
# 60	163.2	3.85	91.13	8.87
# 100	123.9	2.92	94.05	5.95
# 200	100.9	2.38	96.43	3.57
PASA 200	151.2	3.57	100.00	0.00



Cabe mencionar que la cual nos indica los valores que deben cumplir en las diferentes pruebas que se realizan a los materiales pétreos, en la tabla 1 y 2 de dicha norma, la tabla 1 nos indica los rangos de porcentaje de material retenido en cada malla para que cumpla de acuerdo al tamaño nominal para poder ser utilizados en la mezcla asfáltica.

De acuerdo a la granulometría realizada, se obtuvo que tenemos un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ ”, por lo que se tomarán esos datos para compararlos con la granulometría óptima propuesta.

TABLA 54.- REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA (N-CMT-4-04-17, 2017)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo [1] mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 ($\frac{3}{8}$)	12,5 ($\frac{1}{2}$)	19 ($\frac{3}{4}$)	25 (1)	37,5 ($1\frac{1}{2}$)
		Porcentaje que pasa (en masa)				
50	2 in	---	---	---	---	100
37,5	$1\frac{1}{2}$ in	---	---	---	100	90 - 100
25	1 in	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	$\frac{3}{4}$ in	---	100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	$\frac{1}{2}$ in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	$\frac{3}{8}$ in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	$\frac{1}{4}$ in	70 - 89	56 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	Nº4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	Nº10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	Nº20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	Nº40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	Nº60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	Nº100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	Nº200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

Comparando los resultados de la granulometría óptima obtenida con los rangos que debe cumplir para un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ ”, se observa que están dentro de dichos valores. Por lo que se procede a verificar los demás parámetros que debe cumplir el material pétreo.

7.2.- RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN DE LOS CILINDROS

Después de haber analizado los componentes de la mezcla y de haber realizado la experimentación, se procede a colocar los resultados de los especímenes y las pastillas que se realizaron.

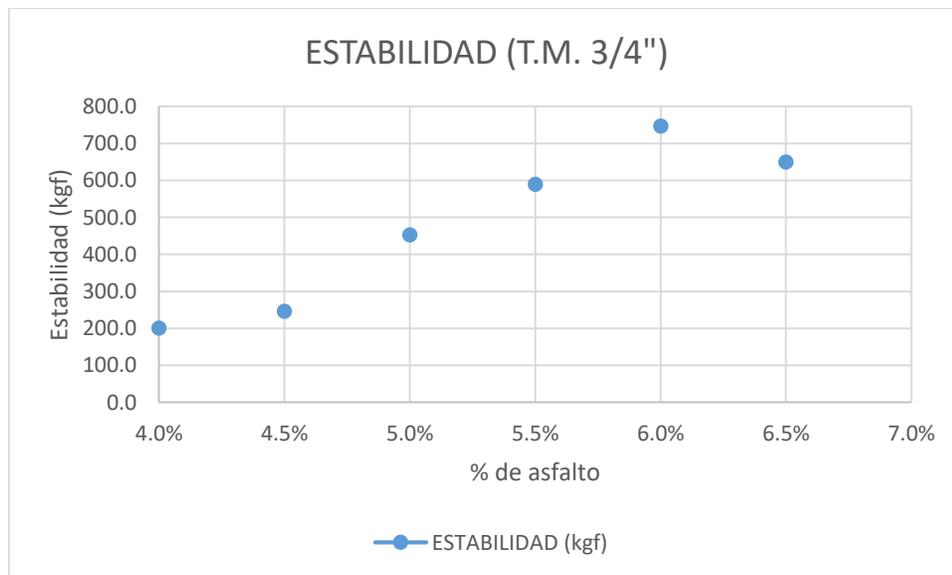


“DISEÑO MARSHALL DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO CON AGREGADOS VOLCÁNICOS DE LA ZONA DE MORELIA, PARA FINES PRÁCTICOS DE BACHEO”



TABLA 55.- RESULTADOS DE ESPECÍMENES CON T.M. ¾” (E. SALINAS R., 2019)

RESULTADOS DE ESPECÍMENES CON T. M. (3/4")			
% de asfalto	LECTURA	PROMEDIO	ESTABILIDAD (kg/cm ²)
4%	3	3.3	200.4
	3.6		
4.50%	4.5	4.05	246.0
	3.6		
5%	7	7.45	452.4
	7.9		
5.50%	9.1	9.7	589.1
	10.3		
6%	12.2	12.3	747.0
	12.4		
6.50%	10.7	10.7	649.8
	10.7		



GRAFICA 5. - RESULTADOS DE ESTABILIDAD DE ESPECÍMENES CON T.M. ¾” (E. SALINAS R., 2019)

Después de probar los especímenes, se realizó la gráfica para poder interpretar de mejor manera los resultados obtenidos y se logra observar que el espécimen con 6% de emulsión asfáltica obtuvo la mayor resistencia con respecto a los demás porcentajes utilizados.

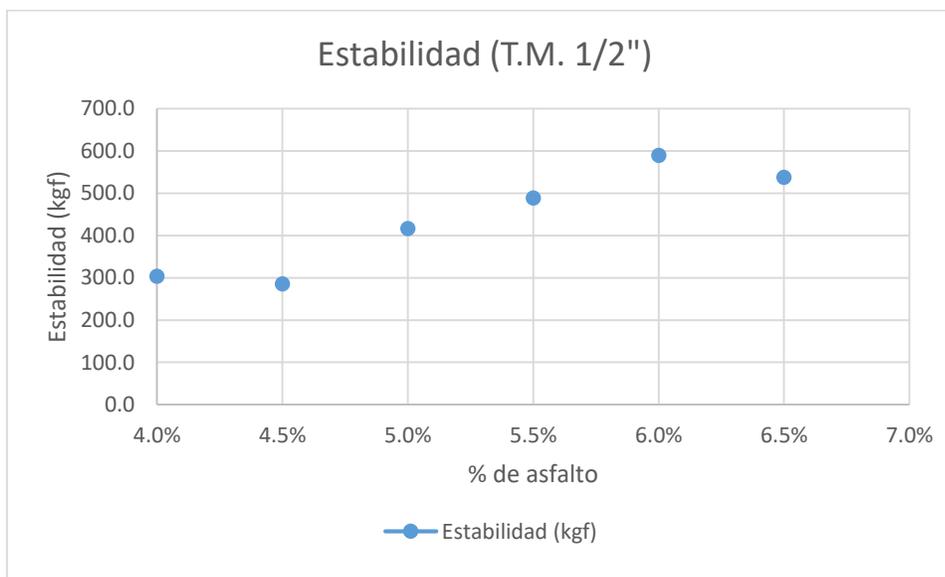
Después se experimentó con una mezcla asfáltica cumpliendo la misma granulometría, pero retirando las partículas de pétreo con tamaño mayor a ½” ya que el diseño será utilizado para bacheo, y por los espesores que se manejan en



las capas de rodadura, se determinó hacer una mezcla con esta característica en específico, por lo que a continuación se presentan los resultados obtenidos para los especímenes con tamaño máximo 1/2”.

TABLA 56.- RESULTADOS DE ESPECÍMENES CON T.M. 1/2” (E. SALINAS R., 2019)

RESULTADOS DE ESPECÍMENES CON T. M. (1/2")			
% de asfalto	ESTABILIDAD	PROMEDIO	ESTABILIDAD (kg/cm ²)
4.0%	4.7	5	303.7
	5.3		
4.5%	4.6	4.7	285.4
	4.8		
5.0%	6.6	6.85	416.0
	7.1		
5.5%	7.5	8.05	488.9
	8.6		
6.0%	9.7	9.7	589.1
	9.7		
6.5%	8.9	8.85	537.5
	8.8		



GRAFICA 6.- RESULTADOS DE ESTABILIDAD PARA ESPECÍMENES CON T.M. 1/2” (E. SALINAS R., 2019)

Ahora al observar las dos gráficas y tablas de los resultados obtenidos en los especímenes, se logra observar que en ambos casos el porcentaje de emulsión que mejor resistencia obtuvo fue el de 6%, la diferencia entre los dos tipos de



especímenes fue la resistencia, ya que el de tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ ” obtuvo una resistencia mayor, dándose una diferencia de poco más de 150 kgf.

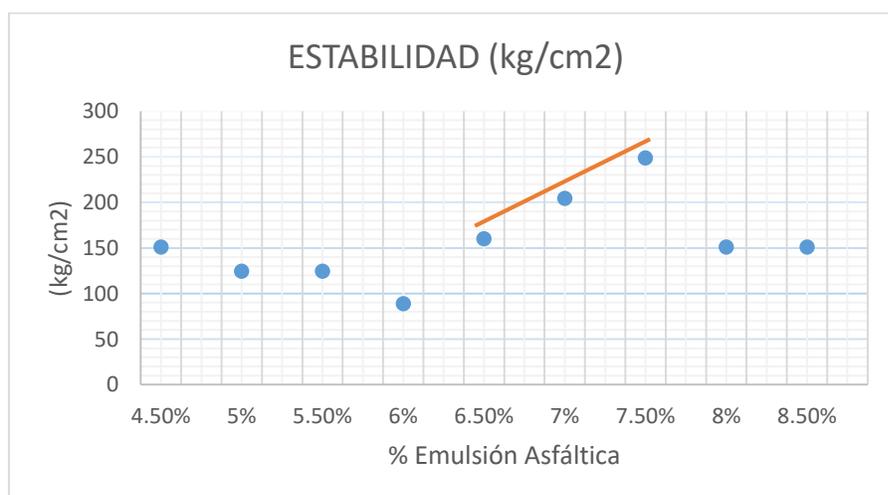
7.3.- RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN DE LAS PASTILLAS

Una vez obtenidos los resultados de los especímenes se procedió a realizar la experimentación en pastillas ya que en los especímenes no hay una norma o resultados para poder compararlos y poder así determinar si la mezcla asfáltica presenta características óptimas para su aplicación.

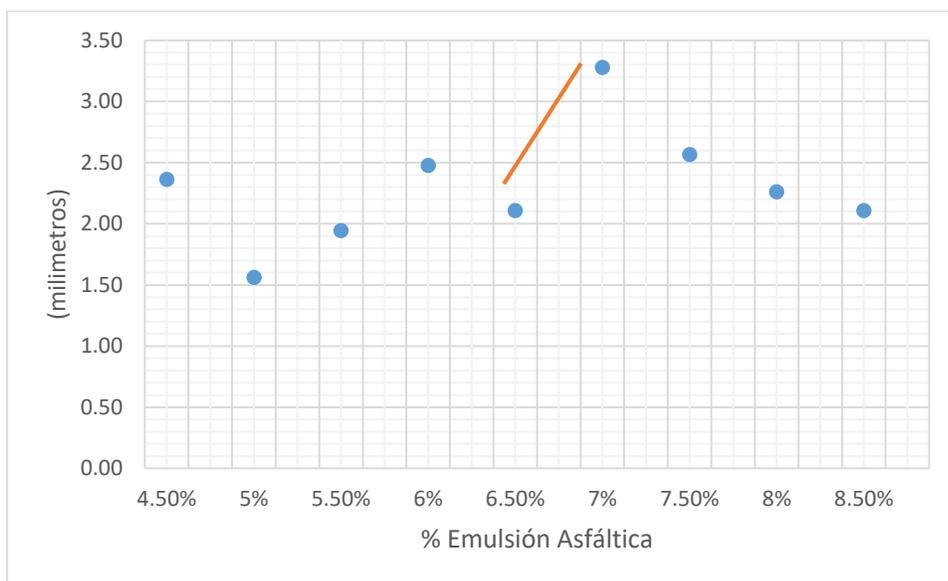
Para comenzar la experimentación se optó por empezar con el porcentaje mínimo de asfalto multiplicado por 1.25 como lo marca el **LIBRO 6 NORMAS PARA MUESTREO Y PRUEBAS DE LOS MATERIALES, EQUIPOS Y SISTEMAS**, por lo que se inició la prueba con el 4.0% de emulsión asfáltica.

TABLA 57.- RESULTADOS DE PASTILLAS (E. SALINAS R., 2019)

PASTILLAS		
% de Emulsión	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
4.50%	150.96	2.3622
5%	124.32	1.5621
5.50%	124.32	1.9431
6%	88.8	2.4765
6.50%	159.84	2.1082
7%	204.24	3.2766
7.50%	248.64	2.5654
8%	150.96	2.2606
8.50%	150.96	2.1082



GRAFICA 7.- ESTABILIDAD EN PASTILLAS (E. SALINAS R., 2019)



GRAFICA 8.- GRAFICA DE FLUJO DE PASTILLAS (E. SALINAS R., 2019)

Al observar los resultados obtenidos de las pastillas se logra determinar que el porcentaje que mejor trabajo fue el 7%, logrando estar entre los mejores valores de resistencia (estabilidad) y deformación (flujo), por lo que se opta como el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica para experimentación con pastillas de 4” de diámetro x 2.5” de altura.



8.- CONCLUSIÓN

Del resultado de las pruebas para ambos métodos de diseño antes descritos y los resultados plasmados en este documento, comparando los resultados obtenidos con los resultados que nos marca la norma **N-CMT-4-05-003/16**, aplicada para mezcla asfáltica de granulometría densa con una intensidad de tránsito $\Sigma L \leq 10^6$.

TABLA 58 TABLA LV.- REQUISITOS DE CALIDAD PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA, DISEÑADAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL (N-CMT-4-05-003-16, 2016)

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

Observamos que para el método “Marshall” no cumple con el requisito de **Estabilidad**, debido a que el valor de estabilidad (248.64 kg) obtenido en dicho método está por debajo de la mitad del que marca la norma (544.31 kg).

Para el requisito de flujo, se observa que el método “Marshall” cumple satisfactoriamente para todos los porcentajes analizados. Por lo que se determina que **el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica** para el método “Marshall” es el **7.5%** debido a que presento el mayor valor en la prueba de estabilidad y uno de los menores valores de flujo. En el método Marshall indica que se debe determinar el porcentaje óptimo cuando en la gráfica se presente el segundo máximo, se toma el mínimo correspondiente a ese máximo y se traza una línea entre ellos, el punto intermedio de estos sería el porcentaje óptimo, pero en este caso dicho valor arroja un valor bajo de estabilidad y un flujo demasiado alto, por lo que se determinó el 7.5% como el valor óptimo para este método.

Al analizar el método “compresión axial y diametral”, solo podemos comparar los resultados con el valor de estabilidad, ya que solo ese requisito se le pudo determinar a los especímenes elaborados, por lo que al observar los resultados y hacer la comparación y al observar que para los dos tamaños máximos de agregados el porcentaje que mejor resultado obtuvo fue el 6%, se determina que el



porcentaje óptimo de emulsión asfáltica para este método es el **6%** de emulsión, cabe mencionar que este valor se puede decir que es aún bajo ya que la mezcla presentaba algunas partículas del agregado pétreo sin cubrir por el asfalto, pero aun así supero el requisito de **Estabilidad** que marca la norma, cabe también mencionar que no hay normativa para este método de diseño, por lo que se optó por compararlo con la normativa del método Marshall.

Al observar que en los dos métodos utilizados para el diseño se presenta una diferencia de 1.5% de contenido de emulsión asfáltica, se concluye que el porcentaje optimo es el 7.5% debido a que el 6% presenta deficiencia para cubrir totalmente las partículas del pétreo, además de que el 6% en el método Marshall presento la estabilidad más baja y flujo intermedio de los valores obtenidos, por lo que **se determina el 7.5% como porcentaje óptimo de emulsión asfáltica.**

También se concluye que el tamaño máximo de agregado pétreo a utilizar sea un **T.M. 1/2"** ya que la mezcla será utilizada con fines prácticos de bacheo y en la mayoría de carpetas los espesores no rebasan los 5 centímetros, por lo que al colocarle tamaños de partículas correspondientes a 3/4" pues estarían abarcando casi la mitad o más del espesor de la carpeta, lo que provocaría que la compactación de la mezcla no sea de buena calidad y por tanto generaría desprendimiento de los agregados y esto generara el bache nuevamente.

Para tamaño máximo de 3/4" se podría utilizar para la colocación de la carpeta, pero para el proceso de bacheo no es recomendable este tamaño de las partículas.



9.- BIBLIOGRAFÍA

AMAAC. (2010). *EMULSIONES ASFÁLTICAS*. MEXICO D.F.: Routes de France.

Asphalt Institute, Asphalt Emulsion Manufacturers Association. (1992). *Manual Básico de Emulsiones Asfálticas Manual No. 19*. USA: Library of Congress.

Domiguez, I. C. (septiembre de 2015). Emulsiones asfálticas; análisis de sus propiedades y comportamiento mecánico en mezclas asfálticas para aplicaciones en mezclas asfálticas. Morelia, Michoacán, México.

IMT. (2000). M-MMP-4-05-004-00. México, D.F., México.

IMT. (2000). M-MMP-4-05-012-00. México, D.F., México.

IMT. (2000). M-MMP-4-05-017-00. México, D.F., México.

IMT. (2002). M-MMP-4-04-002-02. México, D.F., México.

IMT. (2002). M-MMP-4-04-004-02. México.

IMT. (2002). M-MMP-4-04-004-02. México, D.F., México.

IMT. (2002). M-MMP-4-04-006-02. México, D.F., México.

IMT. (2002). M-MMP-4-05-014-02. México, D.F., México.

IMT. (2016). N-CMT-4-05-003-16. México, D.F., México.

IMT. (2017). N-CMT-4-04-17. México, D.F., México.

IMT. (2018). M-MMP-4-04-003-18. México, D.F., México.

laboratorio de materiales "ing. Luis Silva Ruelas", seccion asfaltos. (febrero de 2018). Manual de Prácticas Semestre Par. Morelia, Michoacán, México.

Olvera, S. M. (Julio de 2013). Control de Calidad en las Mezclas Asfálticas Calientes y Templadas. México, D.F., México.

SCT. (2006). N-CMT-4-05-001/06. México , D.F., México.