

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**“DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS DENSAS EN FRIO BASADO EN EL
METODO MARSHALL MODIFICADO DE LA UNIVERSIDAD DE ILLINOIS.”**

PRESENTADO POR:

GUEVARA PALMA, MARLON RODOLFO

MENDEZ DELGADO, HOSNI AMIR.

PIMENTEL GOMEZ, JUAN CARLOS.

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

DOCENTE DIRECTOR:

ING. JORGE WILLIAM ORTIZ SANCHEZ.

SEPTIEMBRE DE 2010

SANTA ANA

EL SALVADOR

CENTRO AMERICA.

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

RECTOR:

ING. Y MSC RUFINO ANTONIO QUEZADA SANCHEZ.

VICE-RECTOR ACADÉMICO:

ARQ. Y MASTER MIGUEL ANGEL PEREZ RAMOS.

VICE-RECTOR ADMINISTRATIVO:

LICDO. Y MASTER OSCAR NOE NAVARRETE.

SECRETARIO GENERAL:

LICDO. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHAVEZ.

FISCAL GENERAL:

DR. RENE MADECADEL PERLA JIMENEZ.

AUTORIDADES DE LA FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE.

DECANO:

LICDO. JORGE MAURICIO RIVERA.

VICE-DECANO:

LICDO. Y MASTER ELADIO EFRAÍN ZACARÍAS ORTEZ.

SECRETARIO DE FACULTAD:

LICDO. VICTOR HUGO MERINO QUEZADA.

JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA:

ING. RAUL ERNESTO MARTINEZ BERMUDEZ.

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE DIRECTOR:

ING JORGE WILLIAM ORTIZ SANCHEZ.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las personas que nos ayudaron a lo largo de todo este proceso académico.

A la Universidad de El Salvador: Que nos dio la oportunidad de ser parte de ella, por educarnos como profesionales.

A la empresa Asfaltos de Centro América (ASFALCA S.A. de C.V.): Que impulsa este tipo de investigaciones académicas.

A nuestro Docente Director: Ing. Jorge William Ortiz Sánchez, por aportar ideas al desarrollo del trabajo de graduación.

A nuestro Asesor externo: Ing. Carlos Mata Trigueros. Por su aporte técnico – profesional.

Al personal que labora en el laboratorio del plantel de ASFALCA, por brindarnos toda la ayuda técnica necesaria para desarrollar éste trabajo de grado.

DEDICATORIA

A DIOS Todo Poderoso, por ser mi Amigo, por guiarme por el buen camino y no dejarme solo en ningún momento, por regalarme sus bendiciones cada día hasta hoy, porque desde un principio de mi carrera tuve la férrea convicción que lo iba a lograr, por el conocimiento para culminar mis estudios con la entrega de este trabajo.

A mis Padres, Raúl Abelino Méndez (QEPD) y Genara V. de Méndez: que con su ejemplo y apoyo me impulsaron a seguir adelante.

A mis hermanas Dalila, Elisa, Sandra, Mayra y mi hermano Marlon, por el aporte que cada uno de ellos hizo a mi persona, independientemente de cuál haya sido, gracias.

A mis compañeros de tesis Juan Carlos y Marlon, por ser muy buenos compañeros y amigos y por haber culminado juntos éste trabajo.

A mis compañeros y amigos con los que forjamos una bonita amistad, Raúl, Félix, Felipe, Verónica, William, y a todas las personas que aportaron su ayuda directa o indirectamente, amigos, primos, y demás personas, Gracias.

Hosni Amir Méndez Delgado.

DEDICATORIA.

A DIOS Todo Poderoso, por ser mi amigo y porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar.

A mi Padre, José Eduardo Palma (QEPD): gracias por ser mi padre y por tanto apoyo y comprensión, que con sus sabios consejos orientó mis pasos por el camino recto, papá este es un logro que quiero compartir contigo. Gracias papá.

A mi Madre, Nora Leda Guevara, eres la mejor mamá del mundo, gracias por todo tu esfuerzo, tu apoyo y por toda la confianza que depositaste en mi y por estar siempre a mi lado. Te quiero mucho mamá.

A mis hermanas Norma, Mirna y mi hermano Roger, quienes con su apoyo moral me ayudaron a no abandonar la batalla contra la adversidad.

A mis compañeros de trabajo de grado Hosni Amir y Juan Carlos, por estar siempre en armonía grupal y convivencia. Gracias compañeros y amigos.

Marlon Rodolfo Guevara Palma.

DEDICATORIA.

Este trabajo se lo dedico primeramente a Dios todo poderoso que me dio vida y fortaleza para poder culminarlo.

A mis padres **Ángel Pimentel Castillo**, por su gran esfuerzo y sacrificio, de quien siempre escuche un buen consejo, y especialmente a mi madrecita **Sara Gómez Solórzano** por haber sido una guía espiritual, buena madre excepcional que nunca dejo de apoyarme y nunca me dejo desfallecer en los momentos más difíciles de mi vida. Y porque ambos me han brindado su apoyo y comprensión incondicional.

A mis hermanas **Cristina Janeth Pimentel** (Yane), **Mirna Roxana Pimentel** (Niña) y **Sara Noemí Pimentel** (Sarita) por creer en mí y en mis sueños y porque siempre estuvieron cuando las necesite. Siempre estarán conmigo durante toda la vida.

A mis hermanos **Ángel Wilfredo Pimentel** y **Germán Mauricio Pimentel** (Mi gran hermano) siempre te recordaré.

A mi querida novia **Iris Marisol**, por comprenderme y apoyarme en todo momento durante el desarrollo de mi carrera.

A mis sobrinos **Mauricio Enrique**, **Jacqueline** y **María Fernanda**.

A mis Asesores y Compañeros de tesis que estuvieron conmigo en todo momento.

Juan Carlos Pimentel Gómez.

INDICE

CAPITULO I GENERALIDADES

1.0 ANTECEDENTES.....	23
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
1.2 OBJETIVOS.....	26
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	26
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
1.3 ALCANCES	27
1.4 LIMITACIONES	29
1.5 JUSTIFICACIONES.....	30

CAPITULO II MARCO TEORICO

2.0 INTRODUCCIÓN.....	33
2.1 LA RED VIAL DE EL SALVADOR.....	34
2.2 MATERIALES PETREOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO.....	35
2.2.1 MINEROLOGIA.....	36
2.2.2 CLASIFICACION DE LOS AGREGADOS PETREOS	37
2.2.2.1 CLASIFICACIÓN POR EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS.....	38
2.2.3 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PETREOS.....	38
2.2.4 PRUEBAS REALIZADAS A LOS AGREGADOS PARA EL DISEÑO.....	40
2.3 ASFALTO.....	41

2.3.1	ORIGEN Y NATURALEZA.....	42
2.3.2	CLASIFICACIÓN Y GRADOS DE ASFALTO.....	47
2.3.3	PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO	48
2.3.4	PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO.	51
2.3.5	CLASIFICACIONES DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS.....	56
2.4	EMULSION ASFALTICA.....	58
2.4.1	HISTORIA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	60
2.4.2	COMPONENTES DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	62
2.4.3	TEORÍA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	64
2.4.4	CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.	66
2.4.5	REQUISITOS DE CALIDAD PARA EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	68
2.4.6	VENTAJAS DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS.	70
2.4.7	CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO EN FUNCION DE LA EMULSION. ..	71
2.4.8	USOS DE LAS EMULSIONES CATIÓNICAS.....	72
2.4.9	ELABORACIÓN DE EMULSION.	72
2.4.10	ENSAYOS REALIZADOS A LA EMULSION ASFALTICA.	78
2.5	METODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN FRIO.....	84
2.5.1	METODO MARSHALL PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS.....	84
2.5.2	GRANULOMETRIA.	85
2.5.3	ESPECIFICACIONES DE LA METODOLOGÍA.	87
2.5.4	EVALUACIÓN Y AJUSTE DE UNA MEZCLA DE DISEÑO.	89
2.5.5	VACÍOS BAJOS Y ESTABILIDAD BAJA.	89
2.5.6	VACÍOS BAJOS Y ESTABILIDAD SATISFACTORIA.....	90
2.5.7	VACÍOS SATISFACTORIOS Y ESTABILIDAD BAJA.....	90

2.5.8 VACÍOS ALTOS Y ESTABILIDAD SATISFACTORIA.....	91
2.5.9 VACÍOS ALTOS Y ESTABILIDAD BAJA.	92
2.5.10 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA.....	92
2.5.11 PRUEBA DE ESTABILIDAD Y FLUJO. (ASTM D 1559, AASHTO T 245).	92
2.5.12 ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS	92

CAPITULO III

DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA EN FRIO

3.0 INTRODUCCION	95
3.1 CARACTERIZACION DE LA EMULSION ASFALTICA.....	96
3.1.1 ENSAYO RESIDUO POR DESTILACION (ASTM D 244, AASHTO T-59).....	96
3.1.2 ENSAYO RESIDUO POR EVAPORACION (ASTM D 244)	100
3.1.3 ENSAYO DE SEDIMENTACION (ASTM D 244).....	103
3.1.4 ENSAYO DE LA CARGA ELECTRICA (ASTM D 44).....	106
3.1.5 VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL	107
3.1.6 TAMIZADO DE LAS EMULSIONES ASFALTICAS EN LA MALLA # 20 (ASTM D 244).....	110
3.1.7 ENSAYO DETERMINACION DEL POTENCIAL DE HIDROGENO (PH) (ASTM D 244).....	112
3.1.8 ENSAYO DE MISCIBILIDAD CON AGUA (ASTM D 244).	115
3.2 CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS.....	118
3.2.1 ANÁLISIS DEL MATERIAL PETREO.....	118
3.2.2 UBICACIÓN DEL SITIO DE OBTENCION DE LAS MUESTRAS.....	119
3.2.3 TAMAÑO DE LAS MUESTRAS.....	119
3.2.4 ENSAYO GRANULOMETRICO PARA AGREGADOS PETREOS. (AASHTO T 27 – 93 Y ASTM D 136).	120

3.2.5 RESISTENCIA A LA DEGRADACION POR ABRACION E IMPACTO DE LOS AGREGADOS GRUESOS (ASTM C 131 / 89, AASHTO T 96 - 92).	124
3.2.6 ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS ANTE LA ACCION DEL SULFATO DE SODIO O SULFATO DE MAGNESIO (AASHTO T 104 – 92, ASTM C 88 – 83).	125
3.2.7 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO (AASHTO T 85 – 91, ASTM D- C 128 - 88).....	127
3.2.8 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCION DEL AGREGADO FINO (AASHTO T 85 – 91, ASTM D- C 128 - 88)	131
3.2.9 EQUIVALENTE DE ARENA (ASTM D 2419).....	136
3.3 ANALISIS GRANULOMETRICO COMBINADO.	140
3.3.1 CALCULO DE LA GRADACION COMBINADA TEORICA DE AGREGADOS PETREOS (AASHTO T 27 – 93, AASHTO T 11 Y ASTM D 136).....	140
3.3.2 ANALISIS DE COMPROBACION POR CEDASOS, DE AGREGADOS FINOS Y GRUESOS (ASTM D 136).....	143
3.4 CALCULO DEL PORCENTAJE DE EMULSION. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).....	146
3.4.1 CALCULO DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN MATERIAL COMBINADO PARA ENSAYO DE RECUBRIMIENTO.....	147
3.5 ENSAYO DE COBERTURA (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).	148
3.5.1 CONTENIDO ÓPTIMO DE RECUBRIMIENTO DE LA MEZCLA.	148
3.6 FABRICACIÓN DE BRIQUETAS DE PRUEBA. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).....	151
3.6.1 CUARTEO DE MATERIAL PARA LA FABRICACION DE BRIQUETAS DE PRUEBA.	151
3.6.2 CONTENIDO OPTIMO DE COMPACTACION PARA LAS BRIQUETAS DE PRUEBA.....	151
3.6.3 PROCEDIMIENTO PARA FABRICACION DE BRIQUETAS DE PRUEBA.....	153

3.7 GRAVEDAD BULK PARA BRIQUETAS DE PRUEBA. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).....	155
3.8 MEZCLA ASFALTICA. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).....	156
3.8.1 VARIACION DEL CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL.....	156
3.8.2 PREPARACION DE LA MEZCLA PARA EL CONTENIDO TEÓRICO DE ASFALTO RESIDUAL.....	156
3.9 ELABORACION DE BRIQUETAS DE DISEÑO. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).....	160
3.10 CURADO DE BRIQUETAS DE DISEÑO. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).	163
3.10.1 ENSAYO DE INMERSION Y VACIO PARCIAL.....	164
3.11 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO)..	164
3.12 VACIOS TOTALES. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).....	169
3.13 ENSAYO DE ESTABILIDAD MARSHALL. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).....	170
3.13.1 CORRECCION DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD	171
3.14 FLUJO DE LOS ESPECIMENES. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).	172
3.15 PERDIDA DE ESTABILIDAD DESPUES DE SATURACION AL VACIO E INMERSION. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).....	172

CAPITULO IV

ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

4.0 INTRODUCCION.....	176
4.1 ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS A LOS AGREGADOS PETREOS.....	177
4.1.1 ANALISIS GRANULOMETRICO	177

4.1.2 ANALISIS DE ENSAYO RESISTENCIA A LA DEGRADACION POR ABRACION E IMPACTO DE LOS AGREGADOS GRUESOS (AASHTO–T 96)	181
4.1.3 ANALISIS DE RESULTADO DE ENSAYO ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS ANTE LA ACCION DEL SULFATO DE SODIO (AASHTO T 104 – 92, ASTM C 88 – 83).....	182
4.1.4 ANALISIS DE RESULTADOS DE ENSAYO GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO.....	183
4.1.5 ANALISIS DE ENSAYO EQUIVALENTE DE ARENA (ASTM D 2419).....	184
4.2 ANÁLISIS DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.	186
4.2.1 ESTABILIDAD SECA Y HUMEDA VRS. CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL %(ASTM D 1559- AASHTO T245-MS 14).	186
4.2.2 VACIOS TOTALES MAXIMOS VTM % VRS. CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL (%) (ASTM D 1559- AASHTO T245-MS 14).....	189
4.2.3 GRAVEDAD ESPECIFICA BULK VRS. CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL EN % (ASTM D 1188, D 2726, AASHTO T 166).....	190
4.2.4 PERDIDA DE ESTABILIDAD (%) VRS. CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL%. (ASTM D 1559, AASHTO T 245 Y M S – 14)	192
4.2.5 FLUJO DE BRIQUETA SECA Y HUMEDA VRS. CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL EN % (ASTM D 1559 MODIFICADA, AASHTO T245, MS 14).....	193
4.2.6 RESULTADOS DEL DISEÑO MARSHALL MODIFICADO MÉTODO ILLINOIS, Y PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL.	195

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES.	198
5.2 RECOMENDACIONES.....	200
BIBLIOGRAFIA.....	201

ANEXOS

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO II

FIGURA 2.1. Explotación del agregado.....	38
FIGURA 2.2 Lago de Asfalto Trinidad.....	43
FIGURA 2.3 Proceso Típico de Refinación De Petróleo	46
FIGURA 2.4 Composición química del Asfalto	50
FIGURA 2.5 Cualidades de cada componente del Asfalto.....	51
FIGURA 2.6 Diagrama esquemático de una emulsión	58
FIGURA 2.7 Representación esquemática de una emulsión aniónica y de una catiónica.....	63
FIGURA 2.8 Esquema para la Fabricación de la Emulsión Asfáltica.....	73
FIGURA 2.9 Diagrama de una Planta de Elaboración de Emulsión Asfáltica.....	74
FIGURA 2.10 Tamaños relativos y distribución de las partículas de asfalto en una emulsión.....	76
FIGURA 2.11 Ruptura de una Emulsión Asfáltica sobre un Material pétreo.....	78
FIGURA 2.12 Ensayo de Carga de Partículas.....	79
FIGURA 2.13 Ensayo de Viscosidad de la Emulsión	79
FIGURA 2.14 Ensayo de Destilación para Emulsión Asfáltica.....	83
FIGURA 2.15 Representación de curva de máxima densidad.....	91

CAPITULO III

FIGURA 3.1 Aparatos utilizados en ensayo de destilación	97
FIGURA 3.2 Forma del protector de el tubo de desprendimiento.....	97
FIGURA 3.3 Esquema de ensayo de carga eléctrica de una emulsión.....	106
FIGURA 3.4 Almacenamiento de Muestras en sacos con su debida identificación...120	

FIGURA 3.5	Juego de Tamices Estándares.....	120
FIGURA 3.6	Tambor de la Máquina los Ángeles.....	124
FIGURA 3.7	Equipo y herramientas para realizar ensayo de Gravedad Especifica.	128
FIGURA 3.8	Cuarteo de material pétreo combinado.....	143
FIGURA 3.9	Muestra de ensayo de recubrimiento con 8% de humedad.....	148
FIGURA 3.10	Emulsión utilizada en el diseño de la mezcla	157
FIGURA 3.11	Adición de Agua para Alcanzar contenido optimo de mezclado.....	158
FIGURA 3.12	Colocación del porcentaje de emulsión y mezclado de materiales ...	159
FIGURA 3.13	Colocación y Distribución del Material dentro del Molde.....	160
FIGURA 3.14	Punzonamiento de mezcla para evitar formación de hormigueros junto a las paredes.....	160
FIGURA 3.15	Colocación de Papel parafinado para evitar perdida de material.....	161
FIGURA 3.16	Compactación de mezcla Aplicando Carga con martillo Marshall....	161
FIGURA 3.17	Rotulación y curado de briquetas.....	162
FIGURA 3.18	Obtención de densidades para cada briqueta.....	162
FIGURA 3.19	Sistema de inmersión y vacio parcial.....	163
FIGURA 3.20	Dispositivo de Extracción de Espécimen.....	163

INDICE DE CUADROS

CAPITULO II

CUADRO 2.1	Red Vial Nacional Prioritaria Pavimentada y No Pavimentada.....	35
CUADRO 2.2	Requisitos para Cemento Asfáltico Graduado por Viscosidad.....	48
CUADRO 2.3	Clasificaciones de las Mezclas Asfálticas	58

CUADRO 2.4	Diferentes tipos de Suspensiones.....	59
CUADRO 2.5	Clasificación de las Emulsiones	68
CUADRO 2.6	Requisitos de Calidad para Emulsiones Asfálticas Aniónicas.....	69
CUADRO 2.7	Requisitos de Calidad para Emulsiones Asfálticas Catiónicas.....	69
CUADRO 2.8	Clasificación del Material Pétreo por su Contenido de Sílice.....	71
CUADRO 2.9	Graduaciones Propuestas para Mezclas Cerradas (ASTM D3515)	87
CUADRO 2.10	Criterios de Diseño de Mezclas Asfálticas Método Marshall.....	88
CUADRO 2.11	Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA).....	88

CAPITULO III

CUADRO 3.1	Tamaños mínimos de Muestras en base al T.M.N.....	119
CUADRO 3.2	Peso de la muestra en función del tamaño máximo del agregado...	121
CUADRO 3.3	Peso mínimo de la muestra para ensayo Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso.....	129
CUADRO 3.4	Rangos Requeridos Granulometría Densa para Pavimentos con Emulsión Asfáltica.....	142
CUADRO 3.5	Prueba de Recubrimiento de la Mezcla	150
CUADRO 3.6	Cuadro resumen elaboración de briquetas de prueba.....	154
CUADRO 3.7	Densidades Bulk para cada briqueta de prueba.....	155
CUADRO 3.8	Cuadro Resumen para elaborar briquetas de prueba.....	156
CUADRO 3.9	Cuadro Resumen para la determinación del porcentaje óptimo de Asfalto Residual	158
CUADRO 3.10	Gravedad Específica Bulk de las 20 Briquetas Ensayadas.....	166

CUADRO 3.11	Gravedad Específica Bulk Seca (Gd), Densidad Específica Bulk Seca (D). Contenido de Humedad de la Briqueta (K).....	168
CUADRO 3.12	Perdida de estabilidad Marshall.....	171
CUADRO 3.13	Flujo y Flujo promedio de los especímenes compactados.....	172
CUADRO 3.14	Pérdida de Estabilidad para el Contenido de Asfalto 3.76.....	173
CUADRO 3.15	Formato para cálculo de ensayo granulométrico (material pétreo Grava 3/4").....	206
CUADRO 3.16	Formato para cálculo de ensayo granulométrico (material pétreo Arena Triturada).....	207
CUADRO 3.17	Formato para Ensayo de Resistencia a la Abrasión e Impacto en la Maquina de Los Angeles	208
CUADRO 3.18	Formato para calculo Ensayo de Agregado para la Determinación de la Sanidad.....	209
CUADRO 3.19	Formato para cálculo de ensayo gravedad específica y absorción agregado pétreo.....	210
CUADRO 3.20	Formato para cálculo de Ensayo Equivalente de Arena.....	211
CUADRO 3.21	Análisis Granulométrico Combinado de Agregados Pétreos (Grava ¾" y Arena triturada).....	212
CUADRO 3.22	Análisis combinado de agregado pétreo utilizando banda de especificación del SIECA.....	213

CAPITULO IV

CUADRO 4.1	Rangos Requeridos Granulometría Densa para Pavimentos con Emulsión Asfáltica.....	177
CUADRO 4.2	Resumen de Granulometría de Arena Triturada	178
CUADRO 4.3	Resumen de Granulometría de Grava 3/4.....	179
CUADRO 4.4	Resumen de Granulometría Combinada.....	180
CUADRO 4.5	Resumen de ensayo Resistencia a la Degradación.....	182

CUADRO 4.6	Resumen de Resultado de Ensayo Estabilidad de los Agregados ante la acción del Sulfato de Sodio	183
CUADRO 4.7	Resumen de Resultados de Ensayo Gravedad Específica y Absorción	184
CUADRO 4.8	Resumen de Resultado de ensayo Equivalente de Arena.....	185
CUADRO 4.9	Resultados Obtenidos de los Ensayos a los cuales se sometieron los Agregados Pétreo	215
CUADRO 4.10	Resultados de estabilidad de Briqueta Seca y Húmeda Vrs. Contenido de Asfalto Residual.....	188
CUADRO 4.11	Resultados de Vacíos Totales Máximos Para Diferentes Contenido de Asfalto Residual en %.....	190
CUADRO 4.12	Resultados de la Gravedad Específica Bulk (promedio) para los Diferentes Contenido de Asfalto Residual.....	191
CUADRO 4.13	Resultados de Pérdida de Estabilidad (%) de Briquetas Secas y húmedas para los Diferentes Contenido de Asfalto Residual	193
CUADRO 4.14	Resultados del Flujo de Briqueta Seca y Húmeda Para Diferentes Contenido de Asfalto Residual.....	194
CUADRO 4.15	Parámetros del Diseño Marshall (ASTM D 1559, AASHTO T 245 y M S – 14) y resultados del Diseño	196

INDICE DE GRAFICOS

CAPITULO II

GRAFICA 2.1	Red vial nacional prioritaria no pavimentada, en porcentaje por departamentos.....	34
GRAFICA. 2.2	Productos y Temperaturas Típica de Destilación.....	44
GRAFICA. 2.3	Representación de grafica granulométrica semilogarítmica.....	86

CAPITULO III

GRAFICA 3.1 Curva granulométrica correspondiente a Grava 3/4"	123
GRAFICA 3.2 Curva granulométrica para la arena triturada.....	124
GRAFICA. 3.3 Representación logarítmica del material pétreo combinado.....	146

CAPITULO IV

GRAFICA. 4.1 Análisis combinado de comprobación	181
GRAFICA. 4.2 Estabilidad de Briquetas en Condición Seca y Húmeda con Diferentes Porcentajes de Asfalto Residual en la Emulsión Asfáltica.....	188
GRAFICA. 4.3 Vacíos Totales Máximos en las Briquetas con Diferentes Contenidos de Asfalto Residual.....	190
GRAFICA. 4.4 Gravedad Específica Bulk (promedio) de Briquetas para Diferentes Contenido de Asfalto Residual.....	191
GRAFICA. 4.5 Grafico 4.5 Perdida de Estabilidad (%) de Briquetas Secas y Húmedas para Diferentes Contenido de Asfalto Residual%.....	193
GRAFICA. 4.6 Flujo de briquetas en Condición Seca y Húmeda con Diferentes Contenido de Asfalto Residual	195

ABREVIATURAS

A.C: Antes de Cristo.

AASHTO: Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y transporte.

ASTM: Sociedad Americana para Pruebas de Material.

FUNDALANAVIAL: Fundación Laboratorio Nacional de Vialidad.

RTFO: Prueba de la Película Delgada en Horno Rotatorio. Simula las características del envejecimiento del asfalto.

SIECA: Secretaría de Integración Económica Centroamericana.

TFO: Prueba de la Película Delgada en Horno.

TMN: Tamaño Máximo Nominal.

VMA: Vacios en el Agregado Mineral.

VTM: Vacios Totales Máximos.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.0 ANTECEDENTES.

En las últimas dos décadas, mucho esfuerzo científico y tecnológico se ha dedicado al desarrollo de materiales asfálticos para la construcción de carreteras, ya que las especificaciones de éstas son cada día más estrictas.

La tecnología en materia asfáltica se ha enfocado al desarrollo de este tipo de carpeta, buscando que cumpla con: una mayor duración, menor ahuellamiento al paso de vehículos, significativa repelencia al agua (alta hidrofobicidad), resistencia a la radiación ultravioleta, resistencia a la lluvia, aumento al agarre con la llanta, mejor adhesión entre el asfalto y el material pétreo, facilidad para la reparación de baches, etc. Todas estas condiciones impuestas al asfalto, dan como resultado una intensa investigación en este campo, llevando al desarrollo de nuevos materiales asfálticos así como nuevas formas en las cuales éste puede ser aplicado al substrato pétreo.

El asfalto tiene varios nombres como: asfalto o bitumen, nafta-betunes, betún, cemento asfáltico. Este producto fue conocido alrededor del año 2500 A.C. en Egipto, aunque en esa época no se usaba en la construcción de caminos. (Revista PAVEMENT: 2003).

En la actualidad tienen una gran variedad de aplicaciones; las que podemos mencionar: carpetas asfálticas, adhesivos, sellantes, impermeabilizantes, entre otros. Los volúmenes de uso son muy grandes, sobre todo en lo referente a la fabricación de carpetas de rodadura en donde es, sin duda el material más importante. El amplio uso de los asfaltos en la construcción de carreteras, es debido en gran medida, a su bajo costo y a sus propiedades de hidrofobicidad y una relativa resistencia al intemperismo. Una de las formas de aplicar el asfalto en una mezcla es a través de altas temperaturas, sin embargo otra forma de usarlo es por medio de emulsiones, comúnmente llamadas “Emulsiones Asfálticas” las cuales son trabajadas en frío¹.

¹ Instituto del Asfalto, Manual MS-22 Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente.

Las emulsiones del tipo asfáltico aparecieron en el mercado a principios del siglo XX en diferentes lugares y con usos muy diversos. A principios de 1900 (en 1905) se empleó por primera vez una emulsión asfáltica en la construcción de carreteras en la ciudad de Nueva York.

*Actualmente los países con mayor producción de emulsiones asfálticas son, en orden de importancia: Estados Unidos, Francia, España y Japón. Entre estos cuatro países se fabrica un 40% aproximadamente de la producción mundial de emulsión asfáltica, que se estima actualmente próxima a los dieciséis millones de toneladas, de la que más del 85% es del tipo catiónico.*²

En El Salvador se ha estado utilizando desde principio de la década de los noventa mezclas emulsionadas en frío para la construcción y mantenimiento de calles, caminos y carreteras, entre estas se puede mencionar algunas como la experiencia del aeropuerto Internacional de Comalapa³, donde se aplicó un Microsurfacing (micro pavimento ó sellos para ampliar el tiempo de vida de las carreteras), se tiene también la calle de acceso principal a Residencial Santa Lucia en Santa Ana, el Blvd. Orden de Malta⁴, entre otras.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Por encontrarse el país en vías de desarrollo y conociendo que el sistema vial es la base primordial para desarrollar la integración tanto económica, como social y cultural entre los habitantes de los países centroamericanos, poseer una adecuada red de carreteras será un factor medular sostenible para tal fin.

² Tomado del documento técnico no. 23 Sanfandila, Qro, 2001. *Emulsiones asfálticas*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (SCT) Instituto Mexicano del Transporte.(IMT)

³ www.ASFALCA.com

⁴ www.ASFALCA.com

A pesar de los grandes avances que se han logrado en el desarrollo científico y tecnológico en el diseño de mezclas asfálticas (mediante el uso de varios métodos en países desarrollados), en la región centroamericana, El Salvador es el país más adelantado en ésta tecnología; no obstante a pesar de éste mencionado avance, aun existen un palpable acomodamiento a formas tradicionales en el uso de las mismas, pues se mantiene un enfoque orientado a las mezclas en caliente, dejando de considerar la posibilidad de avanzar en otras técnicas afines como lo son las mezclas asfálticas en frío que ahora se propone en este estudio investigativo.

Bien es sabido que las mezclas asfálticas en caliente son fabricadas a elevadas temperaturas (en el rango de los 135 a 150 grados centígrados), según la viscosidad del ligante, como también se calientan los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas superiores a la ambiente, pues de lo contrario, estos materiales no pueden extenderse, y menos aún compactarse adecuadamente. Algunas de las limitantes de estos tipos de mezclas son las siguientes: no se pueden colocar a temperatura ambiente, cuando exista amenaza de lluvias y si la velocidad de los vientos lo impida. La producción de estas mezclas implica un aumento significativo en los costos por el consumo de energía, así también, un aumento en la generación de vapores tóxicos y polvos lo cual impacta el medio ambiente.⁵

En busca de darle solución a problemas como estos se hace necesario evaluar las distintas alternativas en el uso del asfalto y así poder tener una reducción de los costos de construcción y mantenimiento para una carretera específica como los generados por las mezclas tradicionales.

⁵ Apuntes técnicos de la empresa ASFALCA (Asfaltos de Centroamerica, S.A. de C.V.), 2008.

Por otro lado, en las mezclas asfálticas en frío el ligante suele ser una emulsión asfáltica, y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente. Los agregados pétreos no requieren secado ni calentamiento, es decir, que se los emplea tal como se presentan en el acopio, con su humedad natural. Estas mezclas también pueden ser elaboradas en la misma planta central destinada a la elaboración de las mezclas en caliente, prescindiendo para ello del sistema de calefacción para el secado de los áridos y el calentamiento y circulación del asfalto.

La mezcla asfáltica en frío permite utilizar una gran variedad de agregados y tipos de emulsiones asfálticas que al combinarlos son aplicables en la reparación de deterioros, en la capa de rodadura o para la construcción de una nueva calzada, seleccionando la que más se adapte a las características del proyecto.

En nuestro país ya existe ésta técnica y está siendo utilizada ampliamente. Algunas empresas como ASFALCA, han recopilado información de este proceso desde hace varios años y están aplicándola no solo a nivel local sino también regional.⁶

Es por esta razón, que se considera importante el estudio de la aplicación de esta tecnología mediante, el desarrollo del trabajo de grado *“Diseño De Mezclas Asfálticas Densas en Frío Basado en el Método Marshall Modificado de la Universidad de Illinois.”*

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL:

- Elaborar un documento en el cuál se den a conocer todos aquellos aspectos más importantes de una mezcla asfáltica densa en frío para

⁶ www.ASFALCA.com

caminos de baja y media intensidad, basado en el método Marshall modificado de la Universidad de Illinois.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Hacer las pruebas de laboratorio que se requieren al material pétreo, para determinar sus características físicas y mecánicas.
- Aplicar las especificaciones técnicas y normas necesarias al proceso de diseño de la mezcla asfáltica densas en frío.
- Diseñar la proporción adecuada de los diferentes materiales que componen la mezcla asfáltica en frío: agregados y emulsión asfáltica.
- Determinar la mejor combinación de agregados que se adapte a la banda de especificación granulométrica.
- Diseñar mezclas de prueba, y determinar la dosificación óptima a través de ensayos de laboratorio, que cumpla con los requisitos establecidos por la Metodología Marshall Modificada.

1.3 ALCANCES

A través de la realización del trabajo de grado **“DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS DENSAS EN FRIO BASADO EN EL METODO MARSHALL MODIFICADO DE LA UNIVERSIDAD DE ILLINOIS”**, se pretende dar una alternativa integral a las inconveniencias que se han venido dando durante décadas en El Salvador en lo que respecta a las mezclas asfálticas en caliente, tomando como base para éste diseño el método Marshall Modificado, lo cual conlleva a:

- Analizar granulométricamente los materiales pétreos (arena triturada y grava $\frac{3}{4}$ ") procedentes de la cantera San Diego, para ajustarla a la banda granulométrica (huso granulométrico) del SIECA que aplique a éste tipo de mezcla.
- Construir tentativamente sesenta especímenes (briquetas) de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 $\frac{1}{2}$ ") y 102 mm (4") de diámetro, para realizar los ensayos requeridos por el método Marshall Modificado.
- Evaluar el desempeño de diversos contenidos de humedad en la mezcla, para determinar la mejor humedad de compactación de los agregados.
- Realizar una variación del contenido de asfalto residual presentes en la emulsión, para determinar el contenido de asfalto óptimo con el cual se obtenga una optima estabilidad.
- Recopilar los resultados de las pruebas realizadas a las briquetas, para determinar el contenido de asfalto óptimo que presente el menor flujo y la mayor estabilidad en el espécimen.
- Realizar los diferentes ensayos tanto a los pétreos como a los especímenes en un periodo de cuarenta días hábiles.
- Documentar la información obtenida mediante la realización de los diferentes ensayos en los laboratorios de la empresa ASFALCA S.A. de C.V.

1.4 LIMITACIONES

El estudio “Diseño de Mezclas Asfálticas Densas en Frio Basado en el Método Marshall Modificado de la Universidad de Illinois” que se realizará, está sujeto a las restricciones que a continuación se presentan:

- ❖ A pesar que las mezclas en frio emulsionadas se vienen trabajando desde la década de los noventa en El Salvador, la información no obstante respecto a estas no está totalmente a disposición pública.
- ❖ Los ensayos se realizarán en el plantel de la empresa ASFALCA S.A. de C.V, consecuentemente, las visitas al laboratorio estarán sujetas al dinamismo interno de ésta, obviamente se usará el equipo de laboratorio que la misma requiere en su desempeño, de ahí que, se realizaran las pruebas mínimas necesarias para obtener un diseño de mezcla funcional, teniendo el tino de no afectar los resultados de la investigación ni interferir en las actividades de laboratorio de la misma.
- ❖ El documento a desarrollar no incluirá el análisis y diseño de las subcapas de una carretera (base y sub-base) ya que, el Método Marshall establece los criterios y parámetros (Compactación, Estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos) que debe cumplir una carpeta de rodadura así como la base sobre la cual se colocara ésta.
- ❖ El trabajo a realizar únicamente llevará la información para realizar el proceso del Diseño de Mezcla Asfáltica Densa en Frío el cual estará basado en el Método Marshall Modificado y tomando como guía para las pruebas a la mezcla el ejemplo “Manual Visualizado para el Diseño de mezclas Asfálticas en Frio” de Venezuela (FUNDALANAVIAL).

1.5 JUSTIFICACION

El asfalto como material ligante en las calzadas de las carreteras de El Salvador ha llegado a ser el material más utilizado en éstas. Por décadas se ha venido usando en las mezclas convencionales en caliente, últimamente se han buscado otras opciones, tales como construir carreteras a base de concreto hidráulico, no obstante, los resultados no han sido los deseados, o mejores que los obtenidos con el uso del asfalto.

La creciente necesidad de encontrar alternativas que armonicen con el medio ambiente está llevando a prescindir cada vez más de las formas tradicionales antes mencionadas, ya que, toda actividad realizada por el hombre debe orientarse a un desarrollo sostenible, es por ello que el diseño de mezclas asfálticas para el uso en las vías nacionales requiere mayor control en cuanto al tema ambiental.

Por otro lado, las mezclas asfálticas emulsionadas tienen mucha aceptación a nivel internacional, pues son amigables con el medio ambiente. Entre sus atributos se puede señalar que la producción de ésta se realiza con bajos gastos energéticos y no ocasionan contaminación al ser colocadas, ya que no emanan vapores tóxicos a la atmosfera (Méndez Pinilla et al, 2002).

Estas mezclas presentan un amplio tiempo para su colocación en relación con las mezclas convencionales en caliente. En primer término porque el ligante es más adaptable a los agregados pétreos locales, y en segundo lugar, porque pueden ser mezclados durante un tiempo más prolongado, es decir que siempre que exista presencia de agua en la mezcla, podrá ser manejable por un largo periodo de tiempo (dependiendo del cuidado se puede almacenar hasta seis meses o más). En cambio, el mezclado en caliente es una operación que se ve limitada en ese aspecto, para evitar el enfriamiento de la mezcla antes de su compactación. (Méndez Pinilla et al, 2002).

Resumiendo, el uso de las mezclas asfálticas en frío representa una alternativa en cuanto a la minimización de costos de inversión y mantenimiento, es decir que cuando se utiliza mezclas asfálticas en caliente se tienen que realizar actividades como calentar los agregados pétreos lo cual disminuye la vida útil de los mismos, además de incurrir en gasto de energía eléctrica, combustible, entre otros. Contrario a esto, las mezclas en frío no tienen este inconveniente además de reducir los impactos negativos al medio ambiente.

Por lo anteriormente expresado se justifica el desarrollo investigativo del:
“Diseño de Mezclas Asfálticas Densas en Frío Basado en el Método Marshall Modificado de la Universidad De Illinois.”

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.0 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace una exposición de conceptos básicos de los elementos utilizados en el diseño de la mezcla asfáltica en frío. Comprende en primer lugar de un análisis de la red vial nacional prioritaria pavimentada y no pavimentada, luego se presenta una descripción de los materiales pétreos utilizados en el diseño de la mezcla asfáltica, estudios y ensayos que se realizan a los agregados, además definiciones, clasificación de los asfaltos, usos de emulsiones asfálticas así como también las ventajas y desventajas de las mismas.

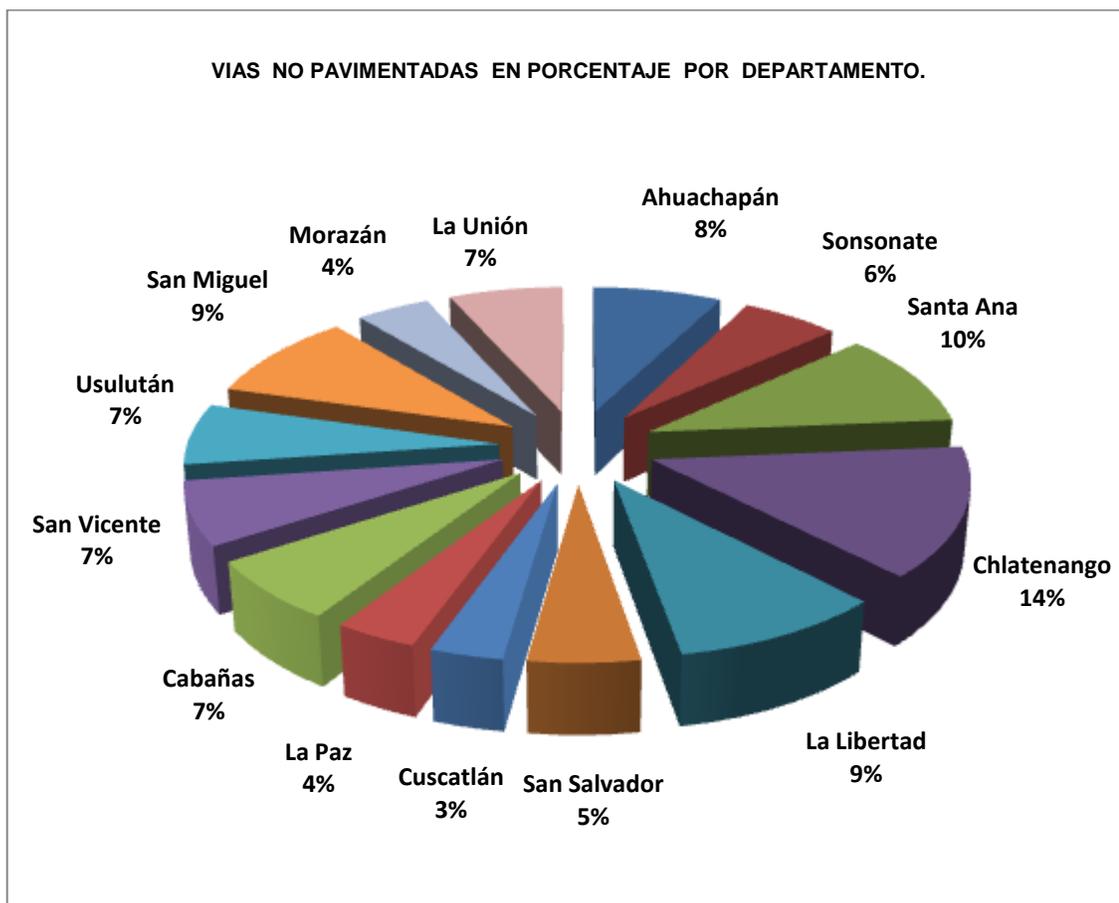
Así mismo, se discute el papel fundamental que juegan características como el comportamiento mecánico de los materiales utilizados, para luego pasar al diseño de la mezcla, la cual se utilizará en la conformación de carpetas de rodadura para tráfico medio y bajo, utilizando emulsión asfáltica.

Por último se presenta una serie de criterios de diseño tomados del método Marshall Modificado de la Universidad de Illinois el cual hace referencia a las normas técnicas y manuales técnicos como: ASTM, AASHTO, Manual Serie-19 y Manual Serie-22 (*ambos del manual series of the Asphalt Institute*), para ciertos materiales y para cada etapa del diseño. Estos se ponen en práctica en las distintas pruebas de laboratorio que se realizan para la elaboración de la mezcla asfáltica.

2.1 LA RED VIAL DE EL SALVADOR.

La red vial nacional está constituida por 5,769.24 km. de vías entre pavimentadas y no pavimentadas de estas el 54.45% lo constituyen la red vial prioritaria no pavimentada y el 45.55% lo constituye la red vial prioritaria pavimentada, lo cual indica que en El Salvador la red vial lo constituyen en su mayor parte las vías no pavimentadas. (Unidad de Planificación Vial (UPV), 2008).

Grafica 2.1 Red vial nacional prioritaria no pavimentada, en porcentaje por departamentos:



Fuente: Ministerio de Obras Públicas. (MOP), *Unidad de Planificación Vial (UPV)*

CUADRO 2.1 Red Vial Nacional Prioritaria Pavimentada y no Pavimentada.

ZONA	DEPARTAMENTO	RED VIAL NACIONAL PRIORITARIA EN KM.	
		Vías Pavimentadas	Vías no Pavimentadas
OCCIDENTAL	Ahuachapán	139.16	239.38
	Sonsonate	243.56	181.89
	Santa Ana	237.41	321.05
CENTRAL	Chalatenango	139.19	440.23
	La Libertad	289.84	301.65
	San Salvador	256.1	157.44
PARA CENTRAL	Cuscatlán	94.3	102.86
	La Paz	286.78	116.8
	Cabañas	62.52	208.93
	San Vicente	123.73	216.3
ORIENTAL	Usulután	234.16	208.02
	San Miguel	193.42	297.4
	Morazán	129.7	137.04
	La Unión	198.28	212.1
TOTAL	---	2628.15	3141.09

Fuente: Ministerio de Obras Públicas. (MOP), Unidad de Planificación Vial (UPV).

2.2 MATERIALES PETREOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO.

DEFINICION:

Un **agregado pétreo** se define como cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas graduadas o fragmentos y que forma parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente o en frío. Conocido también como material granular o agregado mineral.

Los agregados pétreos que se usan tanto en las capas de base granular como para la elaboración de la mezcla asfáltica son: Gravas y arenas

GRAVAS: *Son acumulaciones sueltas de fragmentos de roca que varían en su tamaño entre 2 mm y 7.62 cm de diámetro. Si estas son acarreadas por las aguas, tienen forma redondeada. Suele encontrársele en forma suelta en los lechos, en los márgenes y conos de deyección de los ríos, también en depresiones de terreno rellenados conocidas como canteras.*

ARENAS: *Están formadas por granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, sus partículas varían entre 0.05 mm y 2 mm de diámetro. El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. Las arenas estando limpias no sufren contracciones al secarse, no son plásticas y al aplicárseles carga se comprimen casi instantáneamente.⁷*

El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento. (ASOPAC, 2004)

2.2.1 MINEROLOGIA.

El término mineral se define como una sustancia de origen natural y composición química definida, que se encuentra en la superficie o la corteza terrestre. Las rocas están formadas por diversas clases de minerales, principalmente por compuestos de sílice (silicatos) y carbonatos. En el lenguaje común, el término mineral significa algo que se extrae del subsuelo por contener minerales valiosos. (Maldonado Merino et. al. 2006)

⁷ Si se desea obtener mayor información de este material, se puede consultar el MS – 22 del manual series of the Asphalt Institute

Los minerales tienen una estructura interna definida, compuesta por la combinación de grupos de átomos. El arreglo atómico de los átomos dentro de los grupos tiene un efecto importante sobre la resistencia mecánica de los minerales de las rocas. Cuando la estructura es laminar, el mineral se rompe con facilidad. Otros minerales tienen una estructura interna que solo les permite romperse en forma irregular. En los minerales carbonatados, la estructura molecular es de forma romboédrica y un fragmento del mineral tenderá a romperse en formas similares.

Como los principales minerales formadores de rocas son silicatos (excepto los carbonatos), su estructura molecular se explica en base a la estructura (red cristalina o celda unitaria) de los átomos de silicio y oxígeno. Las cargas con exceso de iones se equilibran con cationes de otros elementos formadores de rocas.

2.2.2 CLASIFICACION DE LOS AGREGADOS PETREOS.

Un sistema de clasificación es un ordenamiento de los diferentes suelos en grupos que tienen características y propiedades similares, con el propósito de facilitar al ingeniero un método para estimar las propiedades o aptitudes del mismo.

Los agregados pueden ser clasificados, sean estos naturales o procesados. De acuerdo con su tamaño, se dividen en gravas y arenas. Los materiales pueden ser producidos en canteras abiertas o tomados de la ribera de los ríos (cantera de río). En este último caso son agregados pétreos aluviales. Los agregados procesados son aquellos que han sido triturados (Ver figura 2.1) y tamizados antes de ser usados. La roca se tritura para volver angular la forma de la partícula y para mejorar la distribución (gradación) de los tamaños de las partículas. (Maldonado Merino et. al. 2006)



FIG. 2.1. Explotación del agregado

2.2.2.1 Clasificación por el Tamaño de las Partículas.

De acuerdo al tamaño de las partículas, estos pueden tomar los siguientes nombres (González Escobar et. al, 2007):

- Guijarros**.....Mayores de 3 pulg. (7.5 cms.)
- Grava**.....entre 3 pulg y el claro de la malla No. 4
- Grava Gruesa**.....de 3 pulg a $\frac{3}{4}$ pulg. (7.5 cm. a 1.9 cm.)
- Grava Fina**.....de $\frac{3}{4}$ pulg al claro de la malla No. 4 (1.9 cm. a 4.8 mm.)
- Arena**.....del claro de la malla No 4 a la malla No. 200 (4.8 a 0.075 mm)
- Arena Gruesa**.....de la malla No. 4 a la malla No. 10 (4.8 mm a 2.0 mm)
- Arena Media**.....de la malla No. 10 a la malla No. 40 (2.0 mm a 0.4 mm)
- Arena Fina**.....de la malla No. 40 a la malla No. 200 (0.4 mm a 0.075 mm)

2.2.3 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PETREOS.

Las propiedades de los pétreos, sean estas físicas o mecánicas, varían con su graduación, su contenido de humedad, su posición vertical con relación a la superficie y su localización geográfica. Los agregados pétreos deben cumplir las siguientes propiedades para ser considerado apropiado para una mezcla asfáltica (ASOPAC, 2004):

- ❖ Gradación y tamaño máximo de partícula.
- ❖ Limpieza.
- ❖ Dureza
- ❖ Forma de la partícula
- ❖ Textura de la superficie
- ❖ Capacidad de absorción
- ❖ Afinidad con el cemento asfáltico

Gradación y tamaño máximo de partícula: Se requiere que las partículas estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño esté presente en ciertas proporciones. Las propiedades físicas y mecánicas de los agregados son función directa de su granulometría y su determinación es fundamental para establecer su comportamiento mecánico, principalmente cuando se somete a cargas directas.

Limpieza: En los agregados existen materiales indeseables que le restan propiedades y afectan desfavorablemente el comportamiento del pavimento. Dentro de estos se tienen vegetación, arcilla esquistosa, terrones de arcilla, materia orgánica, etc.

Dureza: Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla y las exigencias durante la vida de servicio del pavimento.

Forma de la partícula: La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla, la cantidad de fuerza necesaria para compactarla y la resistencia de la estructura del pavimento. Las partículas irregulares y angulares proporcionan las mejores características.

Textura de la superficie: Es un factor que determina la trabajabilidad, la resistencia final de la mezcla y las características de resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento. Según la textura, los

agregados pueden ser rugosos o lisos.

Capacidad de absorción: La capacidad de un agregado de absorber agua o asfalto es un elemento importante de información, pues un agregado poroso requiere mayores cantidades de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

Afinidad con el cemento asfáltico: Es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto.

2.2.4 PRUEBAS REALIZADAS A LOS AGREGADOS PARA EL DISEÑO.

❖ **Ensayos para determinar la limpieza del agregado.**

a) *Índice de consistencia:* Indica la capacidad de la fracción de arenas finas y llenante para retener agua. El valor es establecido según la norma AASHTO T 112 y recomienda un valor del 1% máximo.

b) *Equivalente de arena:* Es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz No. 4. EL requisito que establece la norma AASHTO T 176, para este ensayo tiene un valor de 35 mínimos.

c) *Contenido de materia orgánica:* Proporciona una estimación de la cantidad de materia orgánica presente en el agregado.

❖ **Ensayos para determinar la durabilidad del agregado.**

1) *Coefficiente de pulimento acelerado:* Este pulimento o susceptibilidad al pulimento de los agregados, conseguido mediante la acción de la llanta de la máquina y los abrasivos empleados, pretende reproducir, de manera acelerada, aquel que experimenta el agregado bajo la acción del tránsito real cuando forma parte de la capa de rodadura de una vía.

- 2) *Desgaste en la máquina de Los Ángeles: El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando para ello la máquina de Los Ángeles con una carga abrasiva. El requisito establecido en la AASHTO – T 96 recomienda un valor máximo de desgaste del 40%.*
- 3) *Solidez: Se usa para medir la resistencia de los agregados pétreos frente a la acción de sulfato de sodio o de magnesio, y representa la resistencia de los agregados pétreos frente a la acción de las condiciones ambientales. La especificación según AASHTO T-104 propone un valor de 12% máximo.*

❖ **Ensayos para determinar la forma y angulosidad del agregado.**

- I. *Índice de aplanamiento y de alargamiento: Los índices son una indicación de la cantidad de material (porcentaje de agregado) cuyas medidas proporcionan una forma demasiado alargada o son demasiado planas para ser utilizadas en una mezcla asfáltica., (FLH T) 508 recomienda 30 máx.*
- II. *Porcentaje de caras fracturadas: Se determina el porcentaje, en peso, del material que presenta una o más caras fracturadas de las muestras de agregados pétreos. Caras fracturadas, (FLH T 50T), recomienda 75% min.⁸*

2.3 ASFALTO.

El asfalto es un material negro, cementante que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas

⁸ Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia **ASOPAC**. “Cartilla del Pavimento Asfáltico” Documento de contenido pedagógico. Bogotá 2004

ambientales normales. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla caliente.

El asfalto, según la American Society for Testing and Materials (ASTM), es un material cementante color café oscuro a negro, en el cual los constituyentes predominantes son los bitumen los cuales existen en la naturaleza o son obtenidos por el procesamiento del petróleo. (U.I. D. V, 2010)

En algunos países como Estados Unidos es producido por refinerías modernas de petróleo y es llamado asfalto de petróleo. El grado de control permitido por los equipos modernos de refinería permite la producción de asfaltos con características distintas, que se prestan para usos específicos. Como resultado, se producen asfaltos para pavimentación, techado y otros usos especiales. (M.O.P, Unidad de Investigación y Desarrollo Vial, 2010).

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en pavimentos. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales.

2.3.1 ORIGEN Y NATURALEZA.

A veces existe confusión acerca del origen del asfalto, pero en general, el asfalto es un cementante que ha sido utilizado desde hace muchos siglos en actividades de obras civiles, entre estos la construcción de carreteras.

Al respecto, arqueólogos han documentado el uso de asfaltos como un adhesivo o material impermeabilizante en el Valle de Éufrates, cuatro mil años antes de Cristo, el uso del mismo en Babilonia durante el reinado de Nabucodonosor; es por ello que en épocas pasadas el asfalto que se utilizó fue el natural; el cual se encuentra en la naturaleza en forma de yacimientos

que pueden explotarse sin dificultad y cuyo empleo no requiere de operaciones industriales de ningún tipo para su preparación.

Estos yacimientos se han producido a partir del petróleo por un proceso natural de evaporación de las fracciones volátiles dejando las asfálticas. A este asfalto se le llama frecuentemente asfalto de lago.

Los yacimientos más importantes de asfaltos naturales se encuentran en los lagos de Trinidad (como se puede observar en la figura 2.2), en la isla de Trinidad en la costa norte de Venezuela. Casi siempre se encuentran en las rocas asfálticas, que son rocas porosas saturadas de asfalto.



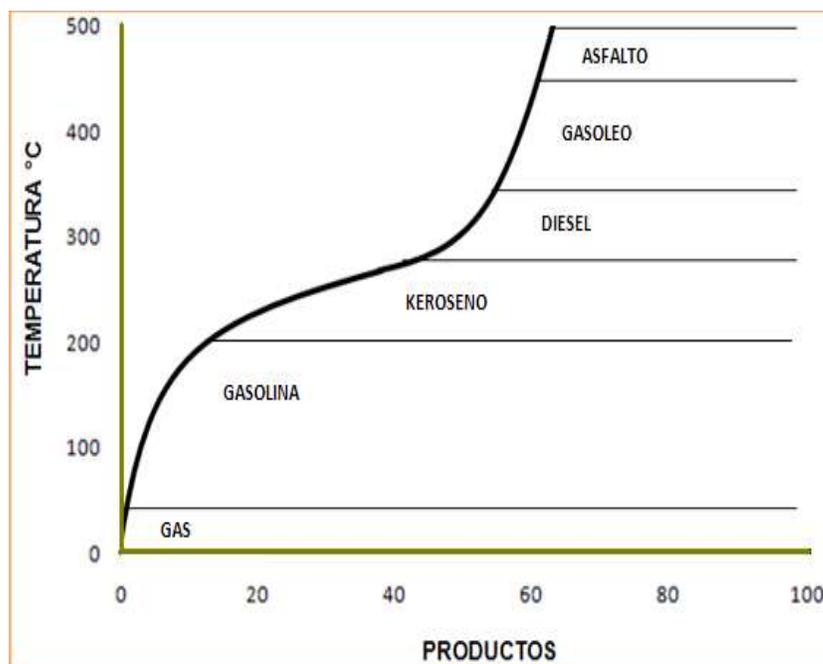
FIG. 2.2 Lago de Asfalto Trinidad

Sin embargo, se puede obtener artificialmente como producto de la refinación, donde las cantidades de asfalto residual varían según las características del crudo; pudiendo oscilar entre el 10 y el 70%. Este asfalto se produce en una variedad de tipos y grados que van desde sólidos duros y quebradizos a líquidos casi tan fluidos como el agua. Esto se debe a que el asfalto es usado para muchos propósitos. (M.O.P, Unidad de Investigación y Desarrollo Vial, 2010).

Los asfaltos mas utilizados en el mundo hoy en día, son los derivados de petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Representan más del 90 % de la producción total de asfaltos. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto y a veces casi en su totalidad.

Refinación del Petróleo: El crudo de petróleo es refinado por destilación. Este es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo por medio de un aumento, en etapas, de la temperatura. Como puede verse en la grafica 2.2, las diferentes fracciones se separan a diferentes temperaturas.

Grafica. 2.2 Productos y Temperaturas Típica de Destilación.



FUENTE: Trabajo de grado “Guía Básica para el Uso de Emulsiones Asfálticas en la Estabilización de Bases en Caminos de Baja Intensidad en El Salvador”

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados mas pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. (M.O.P, Unidad de Investigación y Desarrollo Vial, 2010).

Como se indica en la grafica 2.2, el asfalto puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480°C (900°F). Esta temperatura puede variar un poco, dependiendo del crudo del petróleo que se este refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo.

La figura 2.3 es una ilustración esquemática de una refinaria típica. Dicha grafica muestra el flujo de petróleo durante el proceso de refinación.

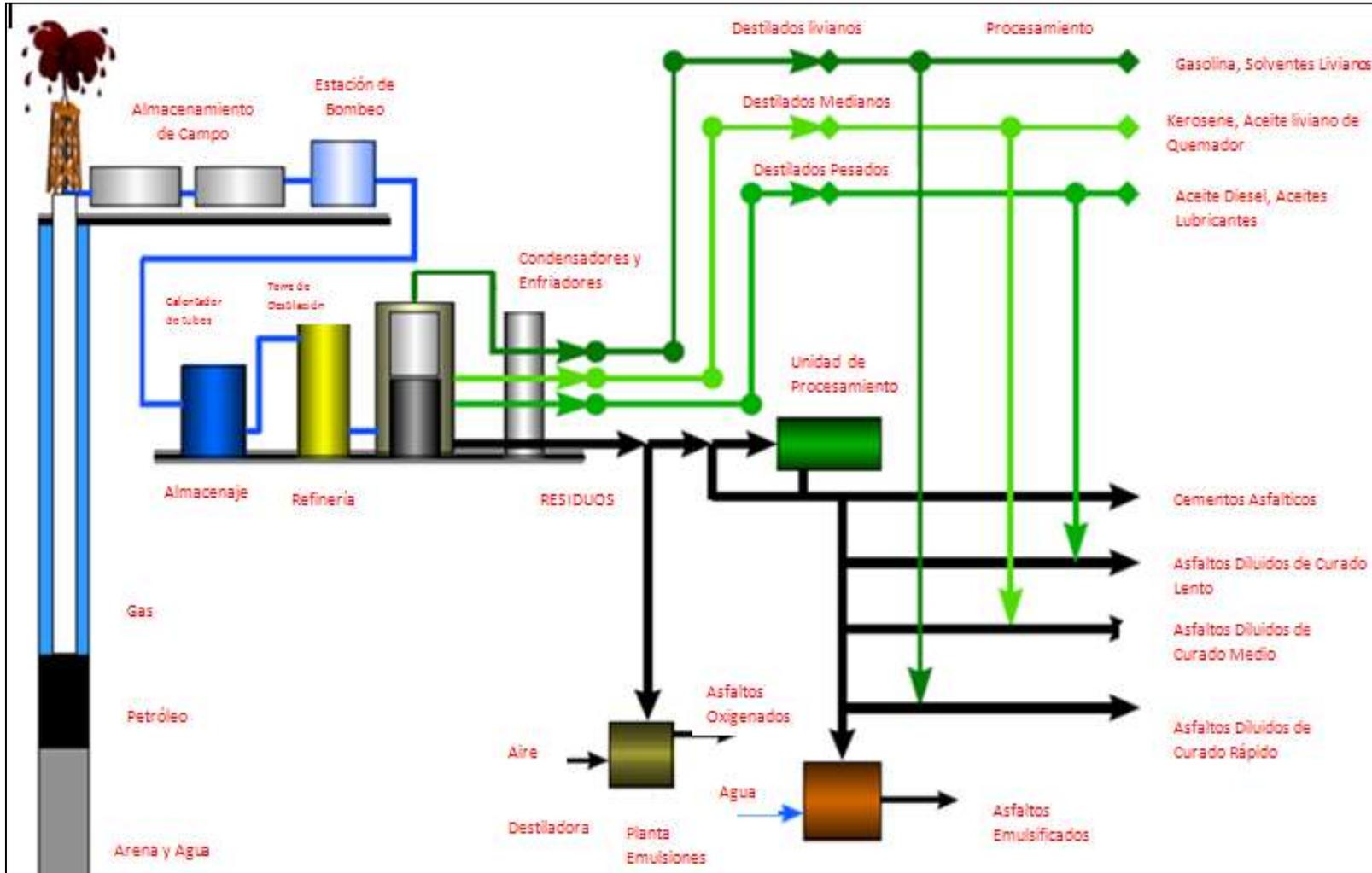
Refinación del Asfalto Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfalto. Los refinadores de crudo deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que producen, para que estos cumplan ciertos requisitos.

Esto se logra, usualmente, mezclando varios tipos de crudos de petróleos antes de procesarlos. El hecho de poder mezclar permite al refinador combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final posea exactamente las características solicitadas por el usuario.

Existen dos procesos por los cuales puede ser producido el asfalto, después de que se han combinado los crudos de petróleo: destilación por vacío y extracción con solventes.

Como se discutió anteriormente, la destilación por vacío consiste en separar el asfalto del crudo mediante la aplicación de calor y vacío. En el proceso de extracción con solventes, se remueven más gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual.

Una vez que los asfaltos han sido procesados, estos pueden ser mezclados entre sí, en ciertas proporciones, para producir grados intermedios de asfalto. Es así como un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso pueden ser combinados para producir un asfalto de viscosidad intermedia. (M.O.P, Unidad de Investigación y Desarrollo Vial, 2010).



FUENTE: Informe de la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial, "Selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en Caliente en El Salvador "

FIG. 2.3 Proceso Típico de Refinación De Petróleo

En resumen para producir asfalto con características específicas, se usa el crudo de petróleo o mezclas de crudo de petróleos. El asfalto es separado de las otras fracciones del crudo por medio de destilación por vacío o extracción con solventes.

2.3.2 CLASIFICACIÓN Y GRADOS DE ASFALTO. (Gonzales Escobar et. al, 2007)

Los asfaltos de pavimentación pueden clasificarse bajo tres tipos generales:

- ❖ Cemento asfáltico
- ❖ Asfalto diluido (o cortado); y
- ❖ Asfalto emulsionado

Los cementos asfálticos se clasifican en tres sistemas diferentes que son:

- ❖ Viscosidad.
- ❖ Viscosidad después de envejecimiento.
- ❖ Penetración.

Cada sistema contiene diferentes grados, cada uno con diferentes grados de consistencia.

El sistema más usado en Estados Unidos esta basado en la viscosidad del asfalto. El cuadro 2.2 muestra el sistema en forma de tablas. Algunas de las agencias, hoy día, han modificado los parámetros del sistema para poder cumplir con necesidades específicas.

A continuación se muestra un cuadro con los requisitos para cementos asfálticos clasificados por viscosidad a 60° C.

**CUADRO 2.2 Requisitos para Cemento Asfáltico Graduado por Viscosidad
(AASHTO M 226)
(Clasificación basada en Asfalto Original)**

PRUEBA	GRADO DE VISCOSIDAD					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
VISCOSIDAD 60 °C, POISES.	250±50	500±100	1000±200	2000±200	3000±600	4000±800
Viscosidad 135 °C, Cs - Min.	125	175	300	350	350	400
Penetracion, 25 °C, 100g, 5 Seg min	220	140	60	50	50	40
Punto Inflamador Cleveland °C, (°F) Min.	163(325)	177(350)	219(425)	232(450)	232(450)	232(450)
Solubilidad en tricloroetileno, porciento Min.	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
PRUBAS SOBRE EL RESIDUO DEL ENSAYO TFO.						
Perdida por Calentamiento, Por ciento Max (opcional) ³		1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
Viscosidad 60 °C, Poises, Max	1000	2000	4000	8000	12000	16000
Ductilidad 25 °C, 5cm por minuto, cm- Min.	100 ¹	100	75	50	40	25
PRUEBA DE MANCHAS (Cuando y como se especifiquen) ² con:						
Solvente Normal de Nafta.	NEGATIVO PARA TODOS LOS GRADOS					
Solvente de Nafta - Xileno, % Xileno.	NEGATIVO PARA TODOS LOS GRADOS					
Solvente de Heptano-Xileno, % Xileno.	NEGATIVO PARA TODOS LOS GRADOS					

FUENTE: Norma AASHTO M 226.

¹ Si la ductilidad es menor que 100, el material será aceptado si la ductilidad a 15.6 ° C tiene un valor mínimo de 100

² El uso de la prueba de mancha es opcional. El ingeniero deberá especificar el tipo de solvente usado cuando se va usar la prueba. En el caso de los solventes de xileno, deberá especificar el porcentaje de xileno a ser usado.

³ El uso del requisito de perdida por calentamiento es opcional.

2.3.3 PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO (Gonzales Escobar et. al, 2007)

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hace muy versátil como material de construcción de carreteras. Los expertos en asfalto y los diseñadores de pavimento han aprendido a identificar y a caracterizar estas

propiedades y a usarlas, dentro de la estructura del pavimento, en la forma más ventajosa posible.

Debe observarse que ninguna de las pruebas que se describen en el cuadro 2.2 para la clasificación del asfalto por viscosidad, menciona la composición química. Esto puede parecer sorprendente, debido a que la composición química es ciertamente uno de los medios usados, más precisos, para identificar las propiedades de cualquier sustancia. Sin embargo, existen varias razones por las cuales la química no ha llegado a ser parte de los sistemas de clasificación:

- ❖ En la actualidad no hay una prueba normal para composición química de asfaltos que sea aceptada mutuamente por los vendedores, los compradores y los usuarios del material.
- ❖ Los ensayos existentes para analizar composición química requieren de equipos sofisticados y pericia técnica que no está disponible en la mayoría de los laboratorios donde se hacen pruebas de asfalto.
- ❖ La relación entre la composición química del cemento asfáltico y su comportamiento en la estructura del pavimento es todavía incierta.

Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos.

El asfalto, cuando es disuelto en solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfaltenos y máltenos, como se presenta en la figura 2.4, una clasificación en forma esquemática de su composición química.



FIG. 2.4 Composición química del ASFALTO.

Los asfáltenos no se disuelven en el heptano. Los asfáltenos una vez separados de los máltenos son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito. Los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza. Los máltenos se disuelven en el heptano. Son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color mas claro.

Las resinas proporcionan las cualidades de adhesivas (pegajosidad) en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfáltenos (parte solida) y las resinas como se observa en la figura 2.5. La proporción de asfáltenos y máltenos en el asfalto puede variar debido a un sinnúmero de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla de pavimento, y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado.

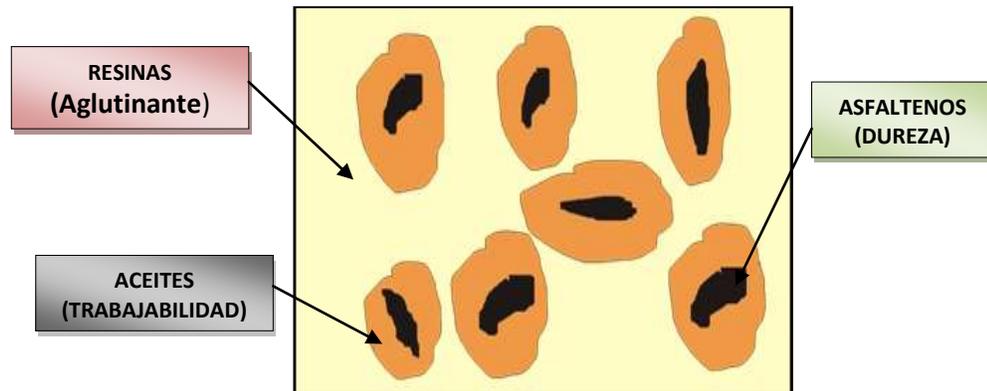


FIG. 2.5 Cualidades de cada componente del ASFALTO.

Las reacciones y cambios que pueden ocurrir incluyen: evaporación de los compuestos mas volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o mas moléculas para formar una sola molécula más pesada), y otros cambios químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto.

Las resinas se convierten gradualmente en asfáltenos, durante estas reacciones, y los aceites se convierten en resinas, ocasionando así un aumento de la viscosidad del asfalto.

2.3.4 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO. (Gonzales Escobar et. al, 2007)

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

a) Durabilidad

Durabilidad es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por consiguiente es difícil de definir

solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la durabilidad del asfalto.

Sin embargo, existen pruebas rutinarias usadas para evaluar la durabilidad del asfalto. Estas son la Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO) ambas incluyen el calentamiento de películas delgadas de asfalto.

b) Adhesión y Cohesión

Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación. Cohesión es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por alguna como relacionada con la adhesión y cohesión. En consecuencia, el es del tipo “clasifica no clasifica”, y solo puede indicar si la muestra es o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos.

c) Susceptibilidad a la Temperatura

Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven mas duros (mas viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y mas blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura, y es una de las propiedades más valiosa en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleo de diferente origen, aun si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

d) Endurecimiento y Envejecimiento

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. Este endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).

El asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras esta revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado. Esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa del mezclado.

e) Pruebas para Determinar las Propiedades del Cemento Asfáltico.

Esta sección describe, en términos generales, las pruebas necesarias para determinar y medir las siguientes propiedades: viscosidad, penetración, punto de inflamación, endurecimiento y envejecimiento, ductilidad, solubilidad y peso específico.

f) Viscosidad

Las especificaciones de los trabajos de pavimentación requieren, generalmente, ciertos valores de viscosidad a temperatura de 60°C (140°F) y 135°C (275°F). La viscosidad a 60°C (140°F) es la viscosidad usada para clasificar el cemento asfáltico. Ella representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede llegar a experimentar durante su servicio. La viscosidad de 135°C (275°F) corresponde, aproximadamente, a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y la colocación. El conocer la consistencia de un asfalto dado a estas dos temperaturas ayuda a determinar si el asfalto es apropiado o no para el pavimento que está siendo diseñado.

g) Penetración

El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba está incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean utilizados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a 25°C (77°F).

h) Punto de Inflamación

El punto de inflamación de un cemento asfáltico es la temperatura mas baja a la cual se separan los materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura mas baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y se quema.

i) Prueba de la Película Delgada en Horno (TFO) y Prueba de la Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO).

Estas pruebas no son verdaderas pruebas. Solamente son procedimientos que exponen una muestra de asfalto a condiciones que aproximan a las ocurridas durante las operaciones de planta de mezclado caliente.

Las pruebas de viscosidad y penetración efectuadas sobre las muestras obtenidas después de los ensayos de TFO y RTFO, son usadas para medir el endurecimiento anticipado, del material, durante la construcción y durante el servicio del pavimento.

j) Ductilidad

La ductilidad es una medida de cuanto puede ser estirada una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida mediante una prueba de “extensión” en donde una probeta de cemento asfáltico es extendida o estirada a una velocidad y a una temperatura específica. El estiramiento continúa hasta que el hilo de cemento asfáltico se rompe. La longitud del hilo de

material en el momento del corte se mide en centímetros y se denomina ductilidad de la muestra.

k) Solubilidad

El ensayo de solubilidad es un procedimiento para medir la pureza de un cemento asfáltico. Una muestra es sumergida en un solvente (tricloroetileno) en donde se disuelven sus componentes cementantes activos. Las impurezas como las sales, el carbono libre y los contaminantes inorgánicos, no se disuelven sino que se depositan en forma de partículas. Estas impurezas insolubles son luego filtradas fuera de la solución y medidas como una proporción de la muestra original.

l) Peso Específico

El peso específico es la proporción del peso de cualquier volumen de material al peso de un volumen igual de agua, ambos a una temperatura determinada. Como ejemplo, una sustancia con un peso específico de 1.6 pesa 1.6 veces más que el agua.

El peso específico de un cemento asfáltico no se indica, normalmente, en las especificaciones de la obra. De todas maneras, hay dos razones importantes por las cuales se debe de conocer el peso específico del cemento asfáltico usado:

- ❖ El asfalto se expande cuando es calentado y se contraen cuando es enfriado. Esto significa que el volumen dado de una cierta cantidad de cemento asfáltico será mayor a altas temperaturas. Las medidas de peso específico proveen un patrón para efectuar correcciones de temperatura – volumen, las cuales serán discutidas más adelante.
- ❖ El peso específico de un asfalto es esencial en la determinación del porcentaje de vacíos (espacios de aire) de un pavimento compactado.

2.3.5 CLASIFICACIONES DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS.

Existen varios parámetros de clasificación para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y estas pueden ser diversas:

a) **Por Fracciones de agregado pétreo empleado.**

- ✓ Masilla asfáltica: Polvo mineral más ligante.
- ✓ Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
- ✓ Concreto asfáltico: Agregado grueso más mortero.
- ✓ Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.

b) **Por la Temperatura de puesta en obra.**

- ❖ *Mezclas asfálticas en Caliente:* Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente. (Maldonado Merino, 2006)
- ❖ *Mezclas asfálticas en Frío:* El ligante suele ser una emulsión asfáltica (debido a que se sigue utilizando en algunos lugares los asfaltos fluidificados), y la colocación en obra se realiza a temperatura ambiente.

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

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas. (Maldonado Merino, 2006)

- ❖ *Mezclas Cerradas o Densas:* La proporción de vacíos no supera el 6 %.
- ❖ *Mezclas Semi – cerradas o Semi – densas:* La proporción de vacíos está entre el 6 % y el 10 %.

- ❖ *Mezclas Abiertas*: La proporción de vacíos supera el 12 %.
- ❖ *Mezclas Porosas o Drenantes*: La proporción de vacíos es superior al 20%.

d) Por el Tamaño máximo del agregado pétreo.

- ❖ *Mezclas Gruesas*: Donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- ❖ *Mezclas Finas*: También llamadas micro aglomerado, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico.

e) Por la Estructura del agregado pétreo.

- ❖ *Mezclas con Esqueleto mineral*: Poseen un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos, se debe a la masilla.
- ❖ *Mezclas sin Esqueleto mineral*: No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

f) Por la Granulometría.

- ❖ *Mezclas Continuas*: Una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico.
- ❖ *Mezclas Discontinuas*: Una cantidad muy limitada de tamaños de agregado pétreo en la banda granulométrica. (Maldonado Merino,2006)

En el siguiente cuadro se muestran resumidas las clasificaciones de las mezclas asfálticas antes descritas:

CUADRO 2.3 Clasificaciones de las Mezclas Asfálticas.

PARAMETROS DE CLASIFICACION	TIPO DE MEZCLA
Fracciones de agregado empleadas.	Masilla
	Mortero
	Concreto
	Macadam
Temperatura de puesta en obra	En Frio
	En Caliente
Huecos en la mezcla (h)	Cerradas (h< 6%)
	Semicerrada (6%<h<12%)
	Abiertas (h>12%)
	Porosa (h>20%)
Tamaño máximo del agregado	Gruesas (t máx. > 10 mm)
	Finas (t máx. < 10 mm)
Estructura del agregado	Con esqueleto mineral
	Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas
	Discontinuas

FUENTE: Publicación Técnica No 299 “Mezclas Asfálticas”. Sanfandila, Qro. 2006 Secretaria de Comunicaciones y Transporte (S.C.T)

2.4 EMULSION ASFALTICA (Rodríguez Talavera y otros 2001)

Se define una emulsión como una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales son no miscibles entre sí y están unidos por un emulsificante, emulsionante o emulgente. Las emulsiones son sistemas formados por dos fases parcial o totalmente inmiscibles, en donde una forma la llamada fase continua (o dispersante) y la otra la fase discreta (o dispersa). Esto puede apreciarse en la Figura 2.6, en donde se muestra un dibujo esquemático de una emulsión.

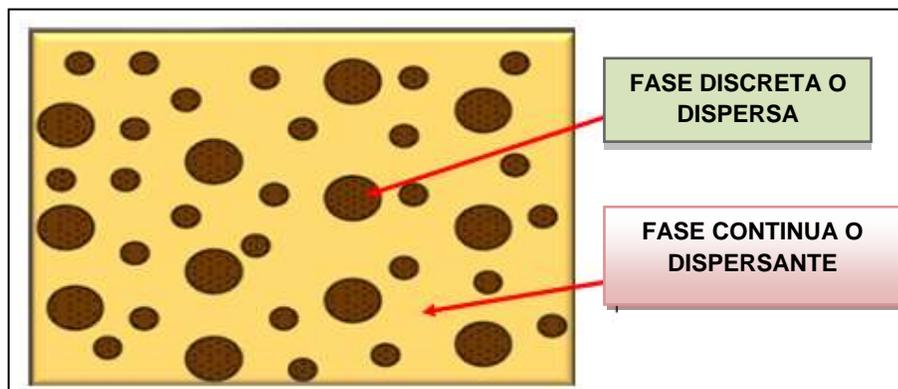


FIG. 2.6 Diagrama esquemático de una emulsión

Generalmente el tamaño de la fase discreta tiene alguna dimensión lineal entre 1 nanómetro y 1 micra. Son estos tamaños tan pequeños los que dan a las emulsiones sus importantes e interesantes propiedades. La ciencia que trata con las emulsiones es multidisciplinaria, ya que involucra física, química, biología, etc. (Gonzales Escobar y otros, 2007)

Existen varios tipos de dispersiones de partículas de diferentes tamaños en diferentes tipos de medios; es entre estas dispersiones que se encuentran las emulsiones, las cuales como ya se mencionó son dispersiones de un líquido en otro. En el siguiente cuadro se muestran los diferentes tipos de suspensiones que existen.

CUADRO 2.4 Diferentes tipos de Suspensiones.

FASE CONTINUA	FASE DISCRETA	SISTEMA
GAS	LIQUIDO	AEROSOLES, NIEBLA, ROCIO
GAS	SOLIDO	SMOKE, AEROSOL
LIQUIDO	GAS	ESPUMA
LIQUIDO	LIQUIDO	EMULSION, SOLUCION COLOIDAL
LIQUIDO	SOLIDO	SOL, SOLUCION COLOIDAL
SOLIDO	GAS	ESPUMAS SOLIDAS(Piedra poma), ZEOLITAS
SOLIDO	LIQUIDO	GEL, EMULSION SOLIDA
SOLIDO	SOLIDO	ALEACION

FUENTE: Manual Serie – 19. Instituto del Asfalto.

Definición de emulsión asfáltica: Las emulsiones asfálticas son una mezcla de asfalto con emulsificantes que con el agua forman una emulsión estable que

permite tender las carpetas asfálticas "en frío", es decir, a temperatura ambiente.

2.4.1 HISTORIA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS. (Rodríguez Talavera y otros, 2001)

Las emulsiones del tipo asfáltico aparecieron en el mercado a principios del siglo XX en diferentes lugares y con usos muy diversos. A principios de 1900 (en 1905) se empleó por primera vez una emulsión asfáltica en la construcción de carreteras en la ciudad de Nueva York; la emulsión utilizada es del tipo aniónica y se empleó en lugar de los usuales caminos fabricados con material pétreo, como una alternativa para evitar el polvo cuando transitaban los vehículos.

En 1914 el estado de Indiana en Los Estados Unidos, comenzó a realizar trabajos de reparación de caminos empleando estas emulsiones aniónicas. En ese mismo año, en Hamburgo, Alemania, se construyó una carpeta asfáltica con un tratamiento superficial de varias capas, empleando una emulsión estabilizada la cual reacciona activamente con la arcilla del substrato pétreo.

Las emulsiones del tipo aniónicas se comenzaron a emplear en Europa en 1925. En la fabricación de éstas se aprovecharon los ácidos nafténicos contenidos en el asfalto para que actuaran como el agente emulsificante en el momento de agregar agua con sosa cáustica al sistema y someterlo a una vigorosa agitación.

Las emulsiones asfálticas se comenzaron a utilizar en México de 1930 a 1935 para la construcción de caminos. El gran inconveniente que tuvieron fue el largo tiempo de rompimiento de la emulsión, que en la época de lluvias causaba muchos retrasos y graves problemas de construcción. Por este motivo, los asfaltos rebajados ganaron la preferencia del constructor.

Las emulsiones asfálticas del tipo catiónicas aparecieron en Europa en 1953 y en Estados Unidos hasta 1958. Aparentemente, su aplicación inicial en la construcción de caminos coincidió con la aparición de nuevos productos químicos tenso-activos en el mercado, los cuales tienen, adicionalmente, otros usos como en el campo de las pinturas, en la industria petrolera, en la industria textil, etc.

Al principio, tales emulsiones se usaron únicamente en la construcción de tratamientos superficiales, como riego de liga y de sello. Al reconocerse la ventaja de las emulsiones catiónicas sobre las aniónicas y los rebajados, se inició la búsqueda de un emulsificante que produjera una emulsión de rompimiento lento, capaz de mezclarse con una granulometría para base o para carpeta.

Las emulsiones catiónicas se conocieron en México en el año de 1960. En ese año se hicieron varias pruebas y los ingenieros mexicanos presentaron en el Congreso Panamericano de Carreteras en Bogotá, Colombia, un trabajo titulado: “Primeras investigaciones realizadas en México con emulsiones asfálticas catiónicas”

En 1973, los países árabes, poseedores de la mayoría del petróleo mundial, aumentaron el valor del barril de petróleo crudo resultando afectados los derivados del mismo, entre ellos los solventes empleados en los asfaltos rebajados; esto provocó un incremento en el uso mundial de las emulsiones asfálticas.

Actualmente los países con mayor producción de emulsiones asfálticas son, en orden de importancia: Estados Unidos, Francia, España y Japón. Entre estos cuatro países se fabrica un 40% aproximadamente de la producción mundial de emulsión asfáltica, que se estima actualmente próxima a los dieciséis millones de toneladas, de la que más del 85% es del tipo catiónico.

2.4.2 COMPONENTES DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS. (Rodríguez Talavera y otros, 2001)

Para comprender porque las emulsiones asfálticas poseen un buen desempeño para elaborar mezclas asfálticas en frío, es esencial examinar el papel de los principales constituyentes (asfalto, agua y emulsivos).

Son tres los componentes básicos de una emulsión asfáltica: cemento asfáltico, agua y un agente emulsivo. También podrían ser parte de estos componentes aditivos, como estabilizadores, mejoradores de adherencia, mejoradores de recubrimiento, 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. Como el caso de lavarse las manos llenas de grasa con un jabón. Algunos de los mismos principios físicos y químicos se aplican a la formulación, producción y uso de emulsiones asfálticas.

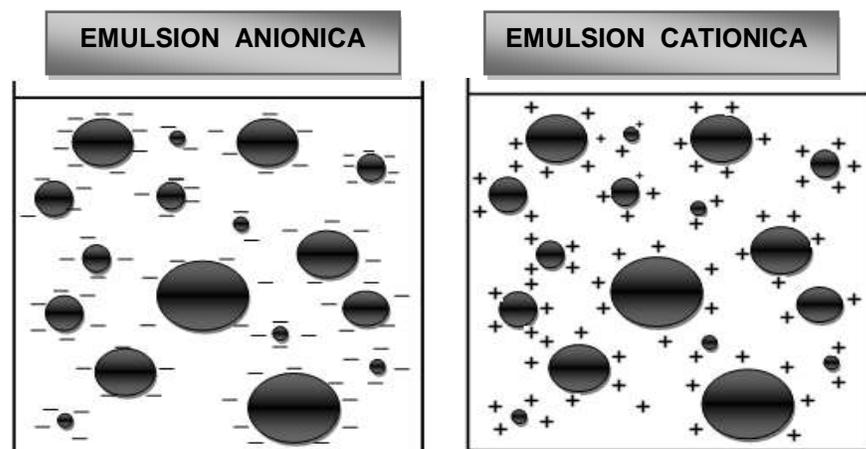
El objetivo es lograr una dispersión estable del cemento asfáltico en el agua, suficientemente estable para ser bombeada, almacenada durante tiempo prolongado, y mezclada. Más aún, la emulsión deberá romper rápidamente al entrar en contacto con el agregado en un mezclador, o al ser distribuida sobre la superficie a trabajar. La rotura es la separación del agua del asfalto, al curar el residuo asfáltico conserva toda la capacidad adhesiva, la durabilidad, y la impermeabilidad propias del cemento asfáltico con el cual fue elaborado.

ASFALTO (también llamado cemento asfáltico): Este es el elemento básico de la emulsión y, en la mayoría de los casos, constituye entre un 50 y un 75% de la emulsión. La química del asfalto es una materia compleja, y no es necesario para el caso, examinar todas sus propiedades. Algunas de las propiedades si afectan significativamente la emulsión final, sin embargo, no hay una correlación exacta entre las propiedades del asfalto y la facilidad con que el

puede ser emulsionado. Si bien la dureza de la base del cemento asfáltico puede variar, la mayoría de las emulsiones es hecha con asfalto con un rango de penetraciones 6 - 25 mm (ver prueba de penetración en apartado 2.3.4.g).

LOS EMULSIFICANTES: son compuestos orgánicos de peso molecular relativamente elevado (entre 100 y 300 g/mol); tienen una parte hidrofóbica (generalmente es una cadena hidrocarbonada ya sea lineal o cíclica) que es soluble en el medio orgánico (en nuestro caso en el asfalto) y una parte hidrofílica (generalmente es un grupo polar de tipo orgánico o inorgánico), soluble en el medio acuoso.

Los emulsificantes están compuestos generalmente por un radical alquilo R el cual es hidrofóbico y un componente hidrofílico, que se encuentran unidos y con el contacto con el agua se disocian, quedando con cargas negativas o positivas según el tipo de emulsificante. En la figura 2.7, se muestra una representación pictórica de la emulsión aniónica y la catiónica:



FUENTE. Doc. Técnico No. 23. "Emulsiones Asfálticas". Instituto mexicano del Transporte. Qro, 2001.

FIG. 2.7 Representación esquemática de una emulsión aniónica y de una catiónica

2.4.3 TEORÍA DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS. (Gonzales Escobar y otros, 2007)

En cuanto a las emulsiones asfálticas, éstas se obtienen cuando el asfalto es mecánicamente separado en partículas microscópicas y dispersadas en agua con un agente emulsivo. Las pequeñas gotas del asfalto se mantienen uniformemente dispersas en la emulsión hasta el momento en que ésta es utilizada. En la emulsión las moléculas del agente emulsivo se orientan rodeando a las gotitas de asfalto. La naturaleza química del sistema emulsivo (asfalto/agua) determina las características de la dispersión y la estabilidad de la emulsión, cuando se utilizan las emulsiones en una obra, el agua se evapora, quedando el agente emulsivo retenido en el asfalto.

Como ya se había mencionado dentro de una emulsión los líquidos que la forman representan dos fases, la fase dispersa o discontinua y la fase dispersante o continúa. A partir de estas fases tenemos que mencionar que existen dos tipos de emulsión según la concentración de cada una de esas fases:

- ❖ Las emulsiones directas: son aquellas en las que la fase hidrocarbonada está dispersa en la parte acuosa.
- ❖ Las emulsiones inversas: son aquellas en las que la fase acuosa esta dispersa en la fase hidrocarbonada.

Las emulsiones que se utilizan en la industria de las carreteras son las directas, es preferible su utilización debido a su baja viscosidad a temperatura ambiente. Por razones de simetría en la acción capilar, los glóbulos de asfalto de la emulsión son de forma esférica. El tamaño promedio del glóbulo de asfalto es de 2 a 6 micras, tan pequeño que hace aumentar la superficie de contacto del asfalto. Favoreciendo el humedecimiento, distribución y cohesión con el material pétreo. (Gonzales Escobar y otros, 2007)

A continuación se analiza su dispersión, en la cual s puede percatar de la facilidad que representa una emulsión en el recubrimiento de los agregados:

El área de un centímetro cúbico de cemento asfáltico, en forma de cubo tendría 6 cm² de superficie.

$$1 \times 1 \times 6 = 6 \text{ cm}^2.$$

Considerando esférico a un glóbulo de asfalto, con diámetro promedio de 4 micras, su volumen será:

El número de glóbulos existentes en un centímetro de cemento asfáltico sería:

— _____

La superficie de un glóbulo sería

La superficie total de ese centímetro cúbico sería:

De aquí que entre más pequeña sea el tamaño de la partícula, mayor será se capacidad para cubrir los materiales pétreos, en comparación con los rebajados o cementos asfálticos. (Gonzales Escobar y otros, 2007).

2.4.4 CLASIFICACIÓN DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS. (Rodríguez Talavera y otros, 2001)

Podemos mencionar que existen dos tipos de emulsiones:

- ❖ Emulsiones formadas por macromoléculas en solución (sistemas de una fase)
- ❖ Emulsiones formadas por materia finamente dividida (sistema de 2 o más fases)

Las podemos dividir en:

- ❖ **Liofílicas:** si la partícula no repele el solvente
- ❖ **Liofóbicas;** si la partícula repele el solvente.

Si el medio es agua, entonces:

Liofílico = Hidrofílico y Liofóbico = Hidrofóbico.

Las emulsiones liofílicas son verdaderas soluciones (desde el punto de vista termodinámico), por lo que no es fácil hablar de la superficie de la emulsión.

Por el contrario, para emulsiones liofóbicas, debido a la diferencia de fases entre las partículas en la emulsión y el medio donde se encuentran dispersas, no existe ningún problema para definir la superficie de la emulsión. Por lo tanto, el concepto de superficie sólo es aplicable a sistemas multifásicos.

Las emulsiones asfálticas pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de estabilizador usado. En este caso podemos hablar de dos tipos, aniónicas y catiónicas:

a) Emulsiones Aniónicas:

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad negativa a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga negativa (ver figura 2.5 en apartado 2.4.2).

b) Emulsiones Catiónicas:

En este tipo de emulsiones el agente emulsificante le confiere una polaridad positiva a los glóbulos, o sea que éstos adquieren una carga positiva (ver figura 2.5 en apartado 2.4.2).

Respecto a la estabilidad de las emulsiones asfálticas, éstas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

1) De Rompimiento Rápido:

Estas se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos (con excepción de la emulsión conocida como ECR-60), la cual no se debe utilizar en la elaboración de estas últimas.

2) De Rompimiento Medio:

Estas normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos es menor o igual al 2%, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.

3) De Rompimiento Lento:

Estas se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas.

4) Para Impregnación:

Estas se utilizan para impregnaciones de sub-bases y/o bases hidráulicas.

5) Súper Estables:

Estas se emplean en la estabilización de materiales y en la recuperación de pavimentos.

Según el contenido de asfalto en la emulsión, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se muestra en el cuadro 2.5

CUADRO 2.5 Clasificación de las Emulsiones.

CLASIFICACION	CONTENIDO DE ASFALTO (% EN MASA)	TIPO DE ROMPIMIENTO	POLARIDAD
EAR - 55	55	RAPIDO	ANIONICA
EAR - 60	60	RAPIDO	ANIONICA
EAM - 60	60	MEDIO	ANIONICA
EAM - 65	65	MEDIO	ANIONICA
EAL - 55	55	LENTO	ANIONICA
EAL - 60	60	LENTO	ANIONICA
EAI - 60	60	PARA IMPREGNACION	ANIONICA
ECR - 60	60	RAPIDO	CATIONICA
ECR - 65	65	RAPIDO	CATIONICA
ECR - 70	70	RAPIDO	CATIONICA
ECM - 65	65	MEDIO	CATIONICA
ECL - 65	65	LENTO	CATIONICA
ECI - 60	60	PARA IMPREGNACION	CATIONICA
ECS - 60	60	SOBRE - ESTABILIZADA	CATIONICA

FUENTE: Manual Serie – 19. Instituto del Asfalto.

2.4.5 REQUISITOS DE CALIDAD PARA EMULSIONES ASFÁLTICAS.

Las emulsiones asfálticas deben de satisfacer los requisitos de calidad que se indican a continuación:

Las emulsiones asfálticas aniónicas, según su clasificación, deben de cumplir con todos los requisitos establecidos (Gonzales Escobar y otros, 2007), ver cuadro 2.6.

CUADRO 2.6 Requisitos de Calidad para Emulsiones Asfálticas Aniónicas

Características	EAR-55	EAR-60	EAM-60	EAM-65	EAL-55	EAL-60	EAI-60
Contenido Asfalto	55	60	60	65	55	60	60
Viscosidad S-F ⁹ (25C)	5	--	--	--	20	20	5
Viscosidad S-F (50C)	--	40	50	25	--	--	--
Asentamiento (5 días)	5	5	5	5	5	5	5
Retenido en Malla 20	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pasa 20 Retiene 60	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Cubre Agregado Seco	--	--	90	90	90	90	--
Cubre Agregado Húmedo	--	--	75	75	75	75	--
Miscible Cemento Portland	--	--	--	--	2	2	--
Carga de las Partículas	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
Demulsibilidad	60 min	50 min	30 máx.	30 máx.	--	--	--

FUENTE: Documento Técnico No. 23 “Emulsiones Asfálticas”. Sanfandila, Qro, 2001. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (SCT). Instituto mexicano del Transporte.

Las emulsiones asfálticas catiónicas, según su clasificación, deben de cumplir con todos los requisitos establecidos en el cuadro 2.7.

Cuadro 2.7 Requisitos de Calidad para Emulsiones Asfálticas Catiónicas.

Características	EAR-60	EAR-65	EAM-70	EAM-65	EAL-65	EAL-45	EAI-60
Contenido Asfalto	60	65	68	65	65	60	60
Viscosidad S-F (25C)	--	--	--	--	25	5	25
Viscosidad S-F (50C)	5	40	50	25	--	--	--
Asentamiento (5 días)	5	5	5	5	5	10	5
Retenido en Malla 20	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pasa 20 Retiene 60	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Cubre Agregado Seco	--	--	--	90	90	--	90
Cubre Agregado Húmedo	--	--	--	75	75	--	75
Carga de las Partículas	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Disolvente (vol.)	--	3	3	5	--	15	--
Indice de Ruptura	< 100	< 100	< 100	80-140	> 120	--	> 120

FUENTE: Documento Técnico No. 23 “Emulsiones Asfálticas”. Sanfandila, Qro, 2001. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (SCT). Instituto mexicano del Transporte.

⁹ Viscosidad S-F: Viscosidad Saybolt Furol, ver apartado 2.4.10.b.

2.4.6 VENTAJAS DE LAS EMULSIONES ASFÁLTICAS. (Rodríguez Talavera y otros, 2001)

En esta sección se detallan las ventajas que tienen las emulsiones asfálticas sobre los asfaltos rebajados y las mezclas asfálticas en fundido (en caliente).

1. Es un ligante asfáltico que no es contaminante ni es peligroso, ya que contiene del 35% al 40% de agua como solvente.
2. Su manejo es sencillo y seguro, gracias a su baja viscosidad a temperatura ambiente.
3. Tiene un límite de almacenamiento y es muy amplio, ya que puede ser almacenado por semanas o meses, debido entre otras cosas a la proximidad que existe en la igualdad de las densidades de sus componentes.
4. Tiene una gran adhesión con cualquier agregado pétreo, a pesar de condiciones de humedad adversas debido a la enorme dispersión de las partículas de asfalto de tamaño muy pequeño y al uso de agentes emulsificantes de tipo catiónico.
5. Se aplica en un lapso muy corto de tiempo, lo que permite la pronta funcionalidad de la obra en que se esté usando.
6. Presenta un bajo costo de la fase dispersante, que es el agua.
7. Se emplean materiales pétreos locales, lo que elimina la transportación de este tipo de materiales por grandes distancias.
8. El equipo de aplicación es mucho más sencillo debido a que todos sus componentes se aplican a temperatura ambiente.
9. Por su aplicación en frío, ayuda a no alterar el medio ambiente y queda suprimida la emisión de humos o gases tóxicos a la atmosfera.
10. El empleo del agua como solvente no crea problema de su desperdicio, ya que es recuperable.

2.4.7 CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL PÉTREO EN FUNCION DE LA EMULSION. (Rodríguez Talavera y otros, 2001).

Debido a que el rompimiento de la emulsión asfáltica se lleva a cabo por la interacción química de ésta con el material pétreo, es necesario conocer el tipo de material pétreo que se tiene, para determinar el tipo de emulsión asfáltica más apropiada.

La clasificación de las rocas tiene en cuenta la proporción en sílice que contienen: ácidas, son las que tienen más del 66 por ciento de dióxido de silicio (Si O₂); intermedias, las que contienen entre 52 y 66 por ciento del mismo mineral y básicas, las que contienen menos del 52 por ciento. En el cuadro 2.8 se muestran rocas representativas de estos grupos.

CUADRO 2.8 Clasificación del Material Pétreo Por su Contenido de Sílice

ROCAS ACIDAS	ROCAS INTERMEDIAS	ROCAS BASICAS
Granitos Granodiorita Granito pórfido Riolita Diacita	Sienita Traquita Traquiandesita Diorita Andesita Fonolita	Gabro Basalto Peridotita Piroxenita Diabasa Dolerita

FUENTE: Documento Técnico No. 23 "Emulsiones Asfálticas". Sanfandila, Qro, 2001. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (SCT). Instituto mexicano del Transporte.

Durante muchos años se tuvo la idea que los materiales silíceos ácidos tenían cargas eléctricas negativas y que los materiales silíceos básicos o alcalinos, cargas positivas. Sin embargo, en trabajos de investigación recientes, ha quedado establecido que todos los agregados pétreos tienen cargas eléctricas negativas, incluyendo granitos, calizas, dolomitas, areniscas, basalto y cuarzo.

Por las características de las emulsiones catiónicas ya mencionadas, se prefieren éstas para la realización de trabajos en ingeniería, con todas las

ventajas que las mismas presentan sobre los asfaltos rebajados y mezclas asfálticas en caliente

2.4.8 USOS DE LAS EMULSIONES CATIONICAS. (Gonzales Escobar y otros, 2007)

El asfalto es un importante material termoplástico que es ampliamente usado en la construcción y sus usos se hacen extensivos a las emulsiones asfálticas cationicas, entre los que destacan:

- ❖ Usos generales.
- ❖ Juntas para pavimentos hidráulicos.
- ❖ Adhesivos.
- ❖ Selladores.
- ❖ Impermeabilizantes.
- ❖ Recubrimiento de tubería especial.

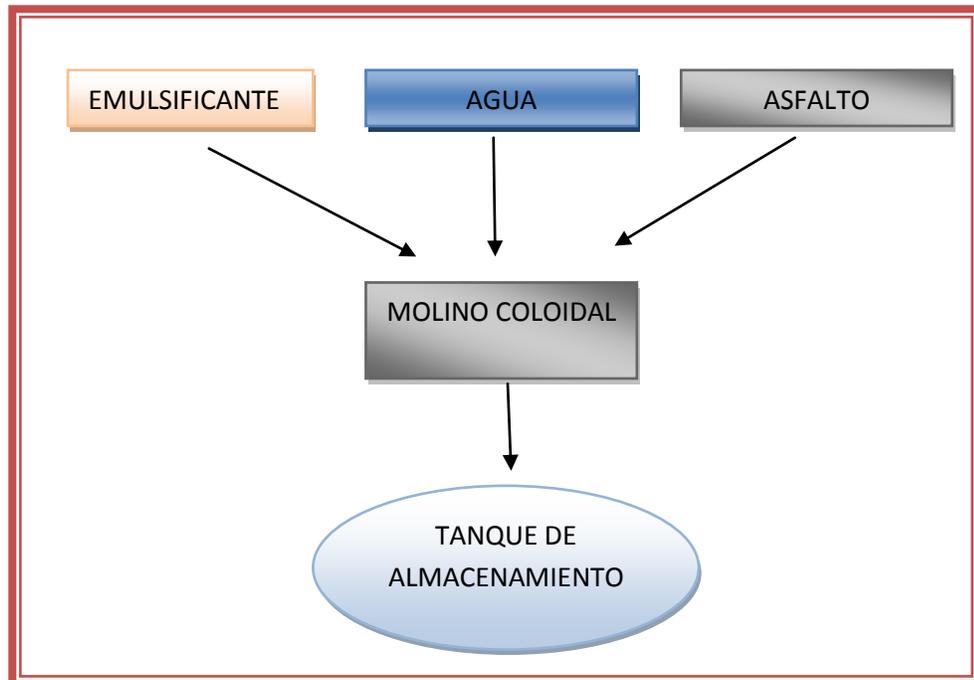
Para tratamientos superficiales, para pavimentos asfálticos, en carreteras y aeropistas:

- ❖ Riegos de impregnación.
- ❖ Riegos de imprimación o penetración.
- ❖ Riegos negros con emulsión diluida.
- ❖ Riegos de liga
- ❖ Riegos de sello con arena o gravilla seleccionada.
- ❖ Morteros asfálticos (slurry seal).
- ❖ Bacheo.
- ❖ En la masa o mezcla asfáltica, para carreteras y aeropistas.

2.4.9 ELABORACIÓN DE EMULSION. (Rodríguez Talavera y otros, 2001)

El equipo y producción para la fabricación de emulsiones es muy simple y fácil de conseguir en el mercado. El problema está en la formulación de las emulsiones que deben adaptarse a los materiales pétreos. Los requerimientos

para la fabricación de las emulsiones asfálticas son sencillos, como se detalla a continuación en la Figura 2.8.



FUENTE. Documento Técnico No. 23. "Emulsiones Asfálticas". Instituto mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro, 2001.

FIG 2.8 Esquema para la Fabricación de la Emulsión Asfáltica.

a) Equipo básico para la elaboración 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 pequeñas gotitas. Un diagrama de una típica planta de elaboración de emulsiones asfálticas se muestra en la figura 2.9. También se necesita un tanque para la solución del emulsivo y un tanque para el asfalto caliente, bombas, y medidores de caudal.

El molino coloidal posee un rotor de alta velocidad (17-100 Hz ó 1000-6000 RPM) con gálidos de paso en el orden de 0.25 a 0.50 mm. 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. Comúnmente se

emplean analizadores de tamaños de partículas para caracterizar la calidad de la emulsión. El tamaño de las gotas de asfalto depende la energía mecánica unitaria aplicada por el molino coloidal. (Rodríguez Talavera y otros, 2001)

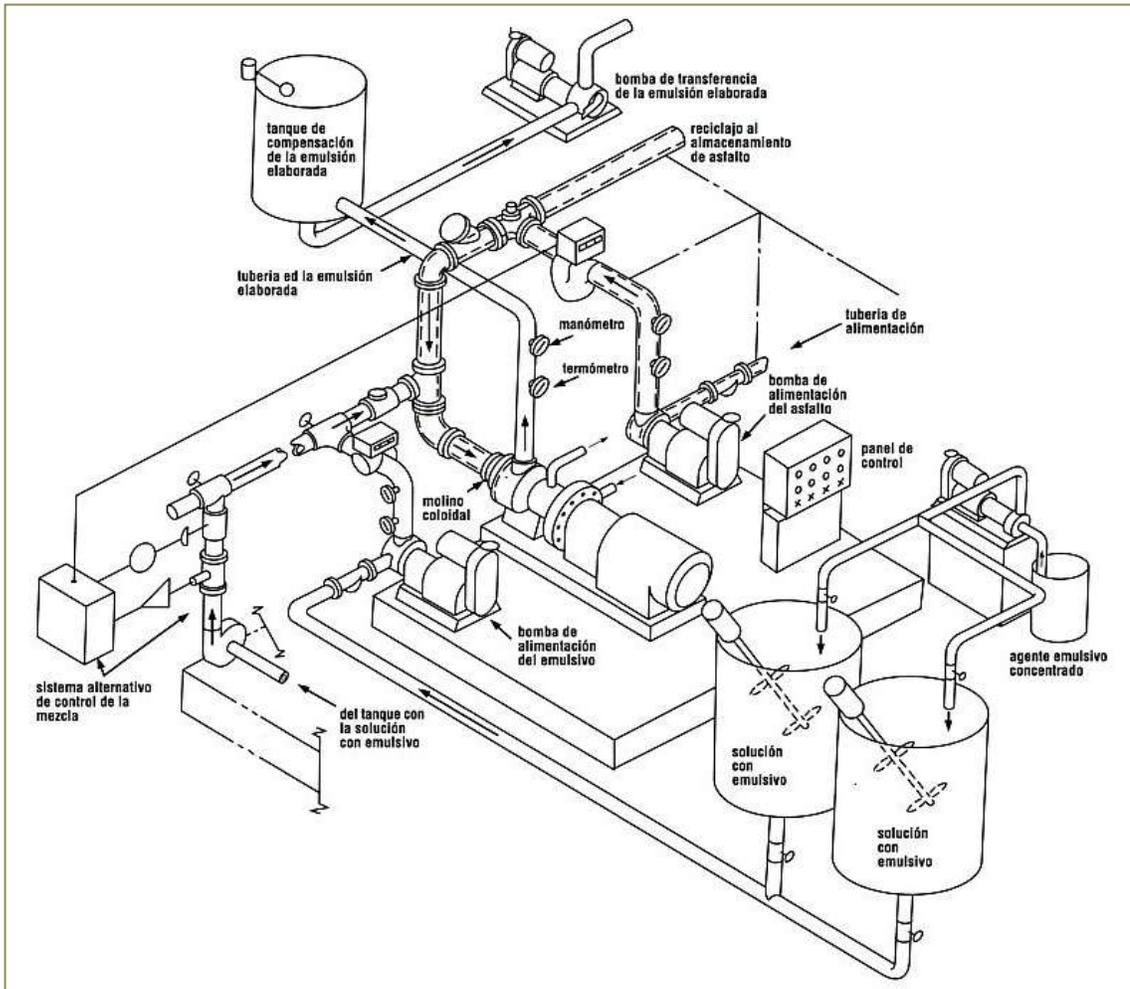


FIG. 2.9 Diagrama de una Planta de Elaboración de Emulsión Asfáltica.

b) Proceso de Emulsificación

Durante el proceso de emulsificación, se alimenta el molino coloidal con asfalto caliente, el cual es dividido en pequeñas gotitas. Al mismo tiempo, se 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 de 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, al 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 el ácido; otros, como los ácidos grasos, deben mezclarse y reaccionar con un álcali. La mezcla de emulsivo se hace comúnmente en un tanque de mezclado por pastones. El emulsivo es incorporado al agua caliente al agua caliente que contiene ácidos 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 verificando la temperatura de cada fase y la descarga del molino. Si se usa el método de regulación de 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. Una fotografía a nivel microscópico de una típica emulsión (ver figura 2.10) pone en evidencia estos promedios de tamaños de partículas. (Gonzales Escobar y otros, 2007).

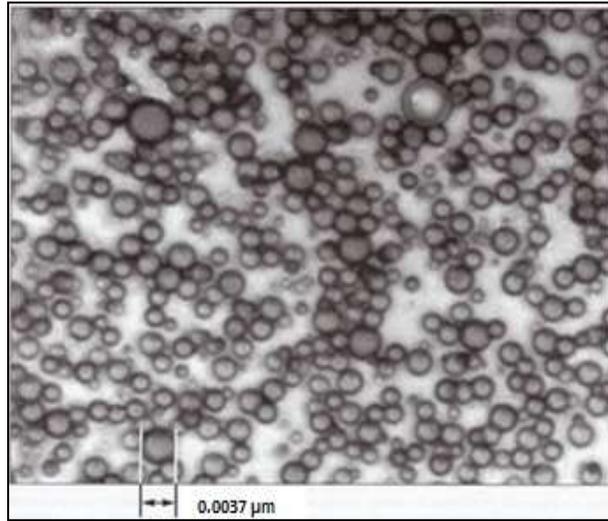


FIG. 2.10 Tamaños relativos y distribución de las partículas de asfalto en una emulsión.

Menor de 0.0001 mm (1 μm).....	28%
0.001 – 0.005 mm (1 – 5 μm).....	57%
0.005 – 0.010 mm (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.

Rompimiento de las Emulsiones Asfálticas.

Cuando se usan emulsiones asfálticas, es necesario tener control sobre la estabilidad de la emulsión, o sea, se tiene que poder controlar el rompimiento de la misma. Pasado un tiempo determinado, el cual depende de la situación en particular que se esté trabajando, las emulsiones tienen que desestabilizarse para que el asfalto se deposite como una capa sobre el material pétreo.

Este fenómeno de rompimiento o ruptura de la emulsión ocurre debido a la carga eléctrica que tiene el material pétreo. (Gonzales Escobar y otros, 2007)

Dicha carga neutraliza la carga de las partículas de asfalto en la emulsión, permitiendo que se acerquen unas a otras para formar agregados de gran tamaño; estos agregados son los que se depositan sobre el material pétreo formando una capa asfáltica.

Durante este proceso el agua es eliminada del sistema asfalto-pétreo. En el proceso de desestabilización, la emulsión como va perdiendo agua, pasa por una emulsión inversa en donde el asfalto forma la fase continua y el agua la fase discreta, es decir, se forman pequeñas gotas de agua en el interior del asfalto, las cuales posteriormente son eliminadas cuando es depositada la capa de asfalto.

En el tipo de emulsión aniónica, los factores que influyen en la ruptura son la evaporación de la fase acuosa, la difusión del agua de la emulsión y la absorción superficial de una parte del emulsificante en el material pétreo.

La ruptura de la emulsión de tipo catiónica se produce por la absorción de la parte polar del emulgente por los agregados, provocando la ruptura de la emulsión y haciendo que las partículas del asfalto se adhieran inmediatamente a las partículas del material pétreo, aun en presencia de humedad.

La forma de rompimiento de estas últimas en la mayoría de los casos, mejora la adherencia y permite una mejor distribución de la mezcla dentro de la masa del agregado pétreo; adicionalmente permite proseguir los trabajos de asfaltado en regiones con climas húmedos o durante una temporada de lluvias, garantizando la apertura de caminos al tránsito en un corto período de tiempo.

En la figura 2.11, podemos observar el proceso de ruptura de una emulsión en tres pasos: primero se observa la emulsión, enseguida cuando se inicia el rompimiento y después cuando se produce la ruptura completa y queda el material pétreo cubierto por el asfalto. (Gonzales Escobar y otros, 2007)



FIGURA 2.11 Ruptura de una Emulsión Asfáltica sobre un Material Pétreo.

2.4.10 ENSAYOS REALIZADOS A LA EMULSION ASFALTICA. (Gonzales Escobar y otros, 2007)

Una adecuada manipulación de la muestra es importante para lograr resultados de ensayos que sean validos. Lógicamente las emulsiones asfálticas se elaboran en caliente, pues el asfalto para llevarlo a una forma fluida necesita altas temperaturas, algunas emulsiones son almacenadas en caliente, y algunas son transportadas y aplicadas en caliente. Las muestras en caliente recogidas en campo son a menudo enviadas al laboratorio a temperatura ambiente. Las muestras de emulsiones asfálticas con requisitos de viscosidad a 50°C deben ser calentadas hasta alcanzar una temperatura de 50 ± 3 °C en un baño de agua a 70°C o en una estufa. Las muestras deben ser removidas, no agitadas, para asegurar homogeneidad.

a) Ensayo de Carga de las Partículas.

El modo operativo de este ensayo se basa en la norma ASTM D 244, es utilizado para identificar emulsiones catiónicas. Para su realización, se sumergen, en una muestra de la emulsión, un electrodo positivo (ánodo) y un electrodo negativo (cátodo); se conectan ambos a una fuente eléctrica de corriente continua controlada (Ver Figura 2.12). Finalizando el ensayo, se observan los electrodos para determinar si en el cátodo se ha depositado una apreciable capa de asfalto. De ser así, se trata de una emulsión catiónica.

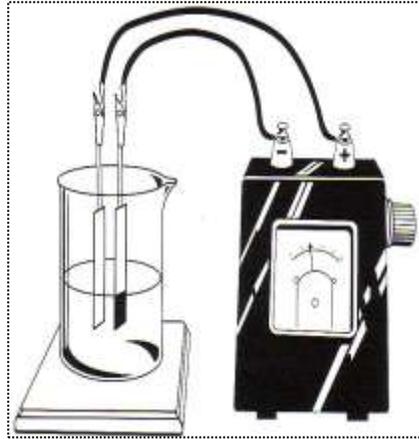


FIG. 2.12 Ensayo de Carga de Partículas

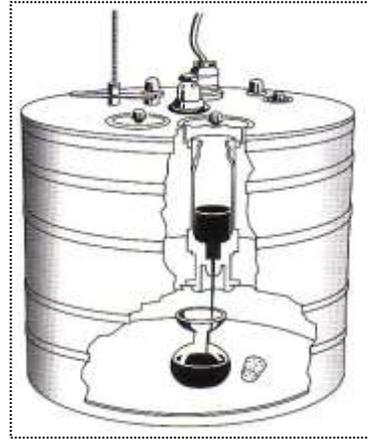


FIG. 2.13 Viscosidad de la Emulsión

b) Viscosidad de la Emulsión.

Este ensayo se basa en la norma ASTM D 244, en donde la viscosidad es definida como la resistencia de un fluido a fluir. Para emulsiones asfálticas, el ensayo de viscosidad Saybolt Furol (Figura 2.13) es utilizado como una medida de la viscosidad. Los resultados Se expresan en segundos Saybolt Furol. Dependiendo del tipo de emulsión, el ensayo se realiza a una de dos temperaturas, 25 °C (77 °F) ó 50 °C (122 °F).

c) Ensayo de Desemulsión.

El ensayo de desemulsión se basa en la norma ASTM D 244, indica la velocidad relativa a la que los glóbulos de asfalto coloidales de una emulsión asfáltica de rotura rápida, romperán cuando se extienden en películas delgadas sobre el suelo o agregado. El cloruro de calcio provoca la coalescencia de los minúsculos glóbulos de asfalto presentes en una emulsión asfáltica aniónica. Se mezcla completamente una solución de cloruro de calcio y agua con una emulsión de rotura rápida: la mezcla se vierte a través un tamiz para determinar el grado de coalescencia de los glóbulos de asfalto. Las especificaciones prescriben la concentración de la solución y la mínima cantidad de asfalto a ser retenida por el tamiz (usualmente, el 60%). Es de esperar que las emulsiones de rotura rápida rompan casi inmediatamente luego de entrar en contacto con el agregado, como en el caso de los tratamientos superficiales.

Un ensayo similar se realiza sobre emulsiones catiónicas de rotura rápida. Sin embargo, aquí se prefiere una solución de dioctyl-sulsuccinato de sodio a la solución de cloruro de calcio.

d) Ensayo de Identificación de Emulsiones Catiónicas de Ruptura Rápida.

Este es un ensayo recientemente normalizado (ASTM D 244) que ha reemplazado al ensayo de clasificación. Al igual éste, consiste en el recubrimiento de arena silícea. En este nuevo ensayo, la arena es primero lavada con ácido clorhídrico y alcohol isopropílico, pero, a diferencia del ensayo de clasificación, no se emplea cemento Portland. La emulsión se mezcla con la arena durante dos minutos. Al finalizar el lapso de mezclado, un exceso en el área sin recubrir comparada con el área recubierta es considerado evidencia de que se trata de una emulsión catiónica de rotura rápida.

e) Identificación de Emulsiones Catiónicas de Ruptura Lenta.

Este es también un ensayo relativamente nuevo (ASTM D 244), que se emplea si el resultado del ensayo de carga de las partículas no es concluyente. Se lava y luego se seca una determinada cantidad de arena silícea; se la mezcla con una determinada cantidad de emulsión catiónica de rotura lenta, hasta que los agregados estén completamente recubiertos. La cantidad de emulsión en la mezcla debe ser el 5% del peso total de arena. La mezcla se cura durante 24 horas y luego se coloca en un vaso de precipitado con agua destilada hirviendo. Luego de 10 minutos, la muestra se coloca sobre una superficie plana y se observa el recubrimiento. Si el recubrimiento supera el 50%, de la mezcla total, se considera evidencia de que se trata de una emulsión catiónica de rotura lenta.

f) Ensayos de Sedimentación y Estabilidad para Almacenamiento.

Estos ensayos ponen de manifiesto la estabilidad de la emulsión durante el almacenamiento. Ellos detectan la tendencia de los glóbulos de asfalto a sedimentar a lo largo de un período de tiempo. Un dado volumen de emulsión se deja reposar en una probeta graduada durante un lapso especificado (cinco

días para el ensayo de sedimentación y 24 horas para el ensayo de estabilidad para almacenamiento), Luego se toman muestras del fondo y de la superficie de la probeta.

Cada muestra se coloca en un vaso de precipitado y es pesada y calentada hasta evaporar el agua. Luego se pesa el residuo. Los pesos obtenidos se utilizan para hallar la diferencia, si la hay, entre los contenidos de residuo asfáltico de las fracciones superior e inferior de la probeta. Dicha diferencia es una medida de la sedimentación. Muchas agencias (vialidades estatales) aceptan el ensayo de 24 horas de duración; otras exigen el ensayo de cinco días.

g) Ensayo de Mezcla con Cemento.

El ensayo de mezcla con cemento se basa en las normas establecidas por ASTM D 244 y AASHTO T 59, representa para las emulsiones asfálticas de rotura lenta lo que el ensayo de desemulsión para las emulsiones de rotura rápida. En la obra, las emulsiones de rotura lenta son a menudo mezcladas con materiales finos y agregados con polvo. En este ensayo, una muestra de emulsión asfáltica se mezcla con cemento Portland finamente molido; la mezcla se lava sobre un tamiz de 1.40 mm de abertura (Malla No.14). Las especificaciones limitan la cantidad de material retenido en el tamiz. El resultado del ensayo indica la capacidad de una emulsión asfáltica de rotura lenta para mezclarse, sin romper con un material de alta superficie específica.

h) Ensayo de Tamiz.

El ensayo de tamiz es otra forma de medir la calidad y la estabilidad de la emulsión (este modo operativo esta basado en las normas ASTM D 244 y AASHTO T 59). La retención de una excesiva cantidad de partículas de asfalto sobre un tamiz indica que puede haber problemas en la manipulación y aplicación del material. En este ensayo, una muestra representativa de emulsión asfáltica es vertida a través de un tamiz de 850 mm (Malla No 20). En

el caso de emulsiones aniónicas, el tamiz y el asfalto retenido son lavados primero con una solución débil de oleato de sodio y luego con agua destilada.

Para emulsiones catiónicas, el lavado solo se hace con agua destilada. Luego del lavado, el tamiz y el asfalto se secan en estufa, determinándose el peso del asfalto retenido.

i) Capacidad de Recubrimiento y Resistencia al Agua.

Este ensayo tiene un modo operativo que se basa en las normas ASTM D 244 y AASHTO T 59, tiene tres propósitos y determina la capacidad de una emulsión asfáltica a: (1) recubrir el agregado completamente, (2) resistir el efecto del mezclado mientras permanece como una película sobre los agregados y (3) resistir la acción de lavado del agua una vez finalizada la mezcla. Este ensayo se emplea principalmente para identificar a las emulsiones asfálticas de rotura media adecuada para mezclarse con agregados gruesos calcáreos. Este ensayo no es aplicable a emulsiones asfálticas de roturas rápida o lenta. El agregado patrón es recubierto con polvo de carbonato de calcio y luego mezclado con la emulsión asfáltica. Aproximadamente la mitad de la mezcla es colocada sobre un papel absorbente, para un examen visual del área de agregado recubierta por la emulsión asfáltica. El resto de la mezcla es rociado con agua, y lavado hasta que el agua corra clara. Este material es colocado sobre un papel absorbente, y se examina su recubrimiento. Se repite el ensayo y, en esta oportunidad, el agregado se moja en agua antes de agregar la emulsión; se mezcla, y luego se examina visualmente su capacidad de recubrimiento (buena, regular o pobre).

j) Residuo de Asfalto y Destilado de Petróleo por Destilación.

Mediante la destilación se separa el agua del asfalto (ASTM D 244 y AASHTO T 59). Si el material contiene destilado de petróleo, este será separado junto con el agua. Las proporciones relativas de cemento asfáltico, agua y destilado de petróleo en la emulsión pueden medirse una vez que la destilación ha finalizado. Sobre el residuo de cemento asfáltico pueden

realizarse ensayos adicionales, con el objeto de determinar las propiedades físicas del asfalto de uso final. En la destilación de emulsiones asfálticas se emplea un alambique de aleación de aluminio y quemadores de anillo (Ver figura 2.14) normalmente, se realiza la destilación a una temperatura de 260°C, durante 15 minutos. Debido a que la emulsión en la obra rara vez alcanza dicha temperatura, vale señalar que ciertas propiedades del residuo pueden ser alteradas, como por ejemplo las propiedades elásticas aportadas por la modificación del asfalto, con polímeros.

k) Residuo por Evaporación

El ensayo de evaporación se basa en las normas ASTM D 244 y AASHTO T 59, se lleva a cabo en una estufa a una temperatura de 163°C durante tres horas. Este ensayo puede realizarse en lugar del ensayo de destilación, pero usualmente los valores de penetración y de ductilidad del residuo son menores que los correspondientes al residuo del ensayo de destilación. Puede prescindirse del ensayo de evaporación si sobre el residuo se realizara el ensayo de flotación.

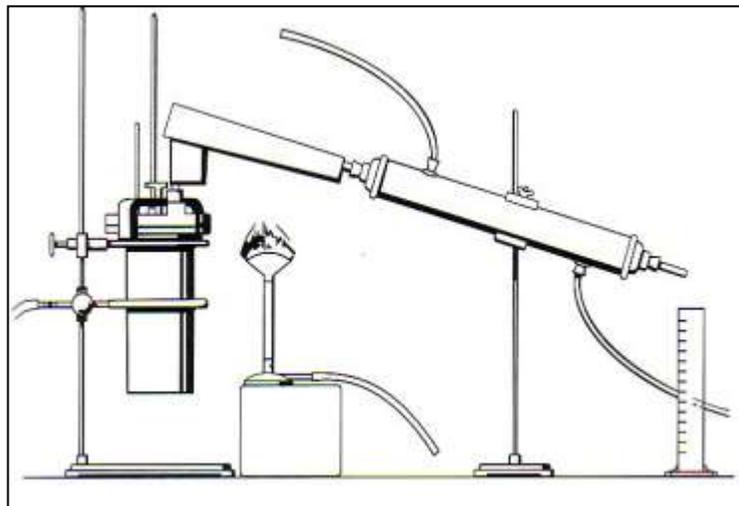


FIG. 2.14 Ensayo de Destilación para Emulsión Asfáltica

2.5 METODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS EN FRIO.

2.5.1 METODO MARSHALL PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFALTICAS.

El concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos de 38 mm (1.5"), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con gradación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba (briquetas) estándar de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto-agregado (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método Marshall son: la densidad - análisis de vacíos, la prueba de estabilidad - flujo de los especímenes compactados; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos. Este método de diseño está basado en la investigación desarrollada en la universidad de Illinois usando un Método Marshall modificado de diseño de mezcla y un ensayo de Durabilidad húmeda. (Garnica Anguas y otros 2004).

Los criterios de ensayos recomendados, son aplicables para mezclas de agregados para base granular de bajos volúmenes de tráfico, conteniendo emulsión asfáltica y agregados minerales de gradación densa. Este método de diseño es recomendado para mezclas en camino o elaboradas en planta, preparadas a temperatura ambiente.

El procedimiento del método de diseño envuelve los siguientes pasos principales:

- ❖ Ensayos de calidad en agregados.
- ❖ Ensayos de calidad en emulsión asfáltica.
- ❖ Tipo y cantidad aproximada de emulsiones asfáltica.
- ❖ Contenido de agua para la mezcla y compactación.
- ❖ Variación del contenido de asfalto residual
- ❖ Selección del contenido optimo de asfalto.

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 °C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

2.5.2 GRANULOMETRIA. (Garnica Anguas y otros 2004).

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica como se observa en la grafica 2.3.

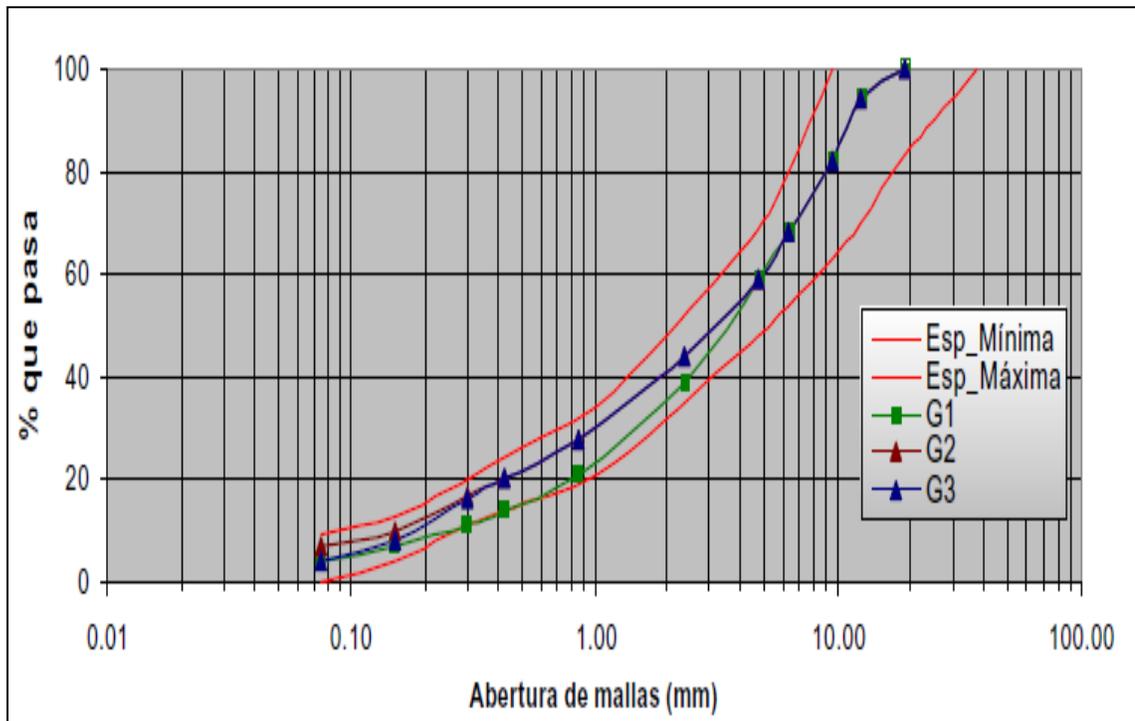


GRAFICO 2.3 Representación de grafica granulométrica semilogarítmica.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior) comúnmente llamado uso granulométrico. Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica.

El cuadro 2.9 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D3515. La gradación a utilizar en una carpeta dependerá del espesor a colocar de mezcla. Para un espesor de capa de 5 a 10 cms. Se utilizará el tamaño de 12.5mm (½ pulg) y en espesores menores a 5 cms. se debe utilizar la gradación de 9.5mm (¾ pulg). En todos los casos la mezcla se colocará en capas (no mayores a dos veces y medio el tamaño máximo de agregado) hasta obtener el espesor especificado. (Garnica Anguas y otros 2004).

CUADRO 2.9 Graduaciones Propuestas para Mezclas Cerradas (ASTM D3515)

MEZCLAS CERRADAS									
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO									
ABERTURA DE MALLA	2in	1 1/2 in	1 in	3/4 in	1/2 in	3/8 in	No. 4	No. 8	No.16
	50mm	37.5mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5mm	9.5mm	4.75mm	2.36mm	1.18mm
GRADUACIONES PARA MEZCLAS DE AGREGADOS (GRUESO, FINO Y FILER)									
2 1/2 in (53mm)	100	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
2 in (50mm)	90 - 100	100	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1 1/2 in (37.5mm)	.....	90 - 100	100	.....	.....	.....	.....	.....	.....
1 in (25.00 mm)	60 - 80	.....	90 - 100	100	.....	.....	.....	.....	.....
3/4 in (19.00mm)	.....	56 - 80	.....	90 - 100	100	.....	.....	.....	.....
1/2 in (12.5mm)	35 - 85	.....	56 - 80	.....	90 - 100	100	.....	.....	.....
3/8 in (9.5mm)	.....	.....	.....	56 - 80	.....	90 - 100	100	.....	.....
No.4 (4.75mm)	17 - 47	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100	.....	100
No.8 (2.36mm)	10 - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100	.....	95 - 100
No.16 (1.18mm)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	40 - 80	.....	85 - 100
No.30 (600µm)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	35 - 65	.....	70 - 95
No.50 (300µm)	10 - 15	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40	.....	45 - 75
No.100 (150µm)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	3 - 20	.....	20 - 40
No.200 (75µm)	0 - 5	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10	.....	9 - 20
ASFALTO, PORCENTAJE CON RESPECTO AL PESO TOTAL DE LA MEZCLA									
	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	5 - 12	6 - 12	7 - 12	8 - 12

FUENTE: Publicación Técnica No 271. "Análisis Comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para Compactación de Mezclas Asfálticas". Instituto mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro, 2005.

2.5.3 ESPECIFICACIONES DE LA METODOLOGÍA.

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios que se discutirán en este capítulo. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4% (NORMA AASHTO T 245, ASTM D 1559 y MS-14). Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (cuadros 2.10 y 2.11). Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar

de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer ajustes, o rediseñar la mezcla.

CUADRO 2.10 Criterios de Diseño de Mezclas Asfálticas Método Marshall.
(Requisitos para la Mezcla Asfáltica en Frío)

METODO DE DISEÑO	VALORES LIMITES	
	MINIMO	MAXIMO
MARSHALL (AASHTO T 245, ASTM D 1559 y MS-14)		
1. Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen		
1.1 Con emulsión asfáltica	50	75
1.2 Con asfaltos líquidos	75	75
2. Estabilidad de acuerdo al uso de la mezcla		
2.1. Para bacheo	2,224 N (500 libras)	
2.2. Para pavimentación	3,336 N (750 libras)	
3. Fluencia en 0.25 mm (0.01 pulgada)	8	16
4. Porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada	3	15
5. Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283 Resistencia retenida		
5.1. Con emulsión asfáltica	50 %	
5.2. Con asfaltos líquidos	75 %	
6. Porcentaje de vacíos relleno con asfalto	65	80

FUENTE: Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. República de Guatemala. Ingenieros Consultores de Centro América, S. A.

CUADRO 2.11 Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)
(NORMA AASHTO T 245, ASTM D 1559 y MS-14)

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.18	No.16	21.5	22.5	23.5
2.36	No.8	19.0	20.0	21.0
4.75	No.6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8.	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2.	13.0	14.0	15.0
19	3/4.	12.0	13.0	14.0
25	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0

FUENTE: Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. República de Guatemala.

2.5.4 EVALUACIÓN Y AJUSTE DE UNA MEZCLA DE DISEÑO.

Cuando se desarrolla una mezcla de diseño, es necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de éstas sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para un diseño preliminar o exploratorio, es aconsejable comenzar con una gradación de los agregados que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la gradación de agregado dentro de los límites especificados puede ser reproducida en una planta mezcladora.

Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o, en algunos casos, rediseñarla. Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar es cambiar la gradación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones. Si el ajuste de los porcentajes no es suficiente, se deberán realizar otras consideraciones (cambio de material pétreo, cambio de cantera, usar otro tipo de asfalto, entre otros). (Garnica Anguas y otros 2005).

2.5.5 VACÍOS BAJOS Y ESTABILIDAD BAJA.

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas. Como un acercamiento general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (en consecuencia proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la gradación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino.

Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tender a bajar la durabilidad del pavimento. Demasiada

reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse.

Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla. (Garnica Anguas y otros 2005).

2.5.6 VACÍOS BAJOS Y ESTABILIDAD SATISFACTORIA.

Bajos contenidos de vacíos pueden eventualmente resultar en inestabilidad debido a flujo plástico o después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un periodo de tiempo ante la reorientación de las partículas y compactación adicional.

Por su parte, insuficientes vacíos pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; sin embargo, la estabilidad es inicialmente satisfactoria por el tránsito específico. Una degradación de agregado pobre durante la producción de la mezcla y/o bajo la acción de tránsito puede ocasionar subsecuentemente inestabilidad y flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente. Por estas razones, mezclas con vacíos bajos tendrán que ajustarse por uno de los métodos dados, en el inciso anterior sin importar que la estabilidad inicial sea satisfactoria. (Garnica Anguas y otros 2005).

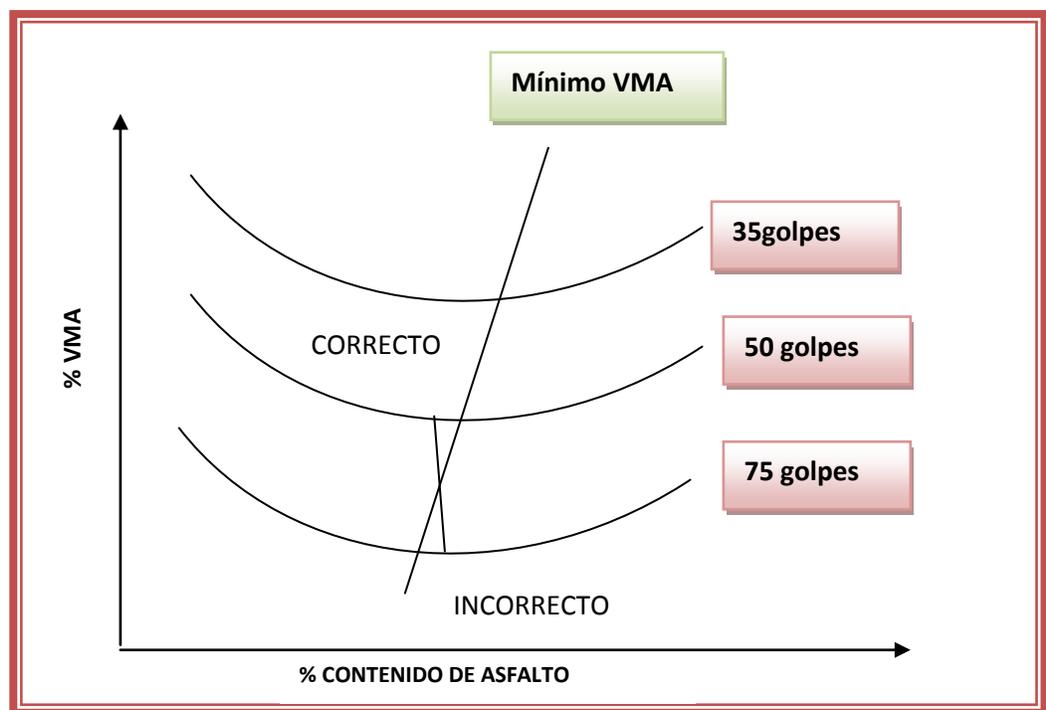
2.5.7 VACÍOS SATISFACTORIOS Y ESTABILIDAD BAJA.

La baja estabilidad cuando los vacíos y la gradación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el mismo. Se deberán tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula, utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la

mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo de éstos. Partículas de agregado con textura rugosa y superficies menos redondeadas, presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

2.5.8 VACÍOS ALTOS Y ESTABILIDAD SATISFACTORIA.

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente a mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través del pavimento pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos. Pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad, como se muestra en La figura 2.15 (Garnica Anguas y otros 2005).



FUENTE: Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes. Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. República de Guatemala.

FIG 2.15 Representación de curva de máxima densidad.

2.5.9 VACÍOS ALTOS Y ESTABILIDAD BAJA.

Se deberán tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores; y en el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacer una consideración de la calidad de los materiales, conforme a los subtemas 2.5.6 y 2.5.7. (Garnica Anguas y otros 2005).

2.5.10 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA.

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto las características volumétricas como mecánicas de las mezclas asfálticas compactadas. La prueba de gravedad específica es una de ellas y se desarrolla de acuerdo con la Norma ASTM D2726, gravedad (específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando superficies saturadas de especímenes secos). En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado, se necesitará la gravedad específica máxima, G_{mm} , para cada contenido de asfalto con el fin de calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto. La precisión del ensayo es mejor cuando la mezcla está cerca del contenido de asfalto de diseño. Además, es preferible medir la gravedad específica máxima por duplicado o triplicado. (Garnica Anguas y otros 2005).

2.5.11 PRUEBA DE ESTABILIDAD Y FLUJO. (ASTM D 1559, AASHTO T 245).

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo con el equipo de prueba Marshall, esta prueba refleja que tan estable es la mezcla ante el sometimiento de carga estática vertical y el flujo revela el comportamiento de la mezcla ante la tracción.

2.5.12 ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS (ASTM D 1559, AASHTO T 245).

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se lleva a cabo el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba.

Para hacer un Análisis de Densidad y Vacíos se debe determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente los que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado, se calcula de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado, así como el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas, la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (V_a), porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA), y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA). (Garnica Anguas y otros 2005).

CAPITULO III

DISEÑO DE MEZCLA

ASFALTICA EN FRIO

3.0 INTRODUCCION

En los capítulos anteriores se trataron aspectos sobre el método Marshall y los aspectos para el diseño de Mezclas Asfálticas en Frio, así como las normas aplicables al diseño de la misma.

En el presente capítulo se desarrollan las pruebas de laboratorio necesarias para llevar a cabo el diseño de la mezcla en estudio propuesta, éstas se le harán a las muestras de material pétreo obtenidas en banco de material ubicado en el municipio de San Diego departamento de La Libertad, se presenta el procedimiento para la caracterización de la Emulsión, aclarando que estos ensayos no se realizaron, por tal motivo, no aparecen resultados de la misma y solo se describen dichos ensayos con la respectiva norma que los ampara.

El capítulo está dividido principalmente en tres partes: La primera que constituye la descripción detallada del procedimiento para la caracterización de la emulsión asfáltica, la segunda corresponde al análisis del material pétreo (grava $\frac{3}{4}$ " y arena triturada), y finalmente se aborda las pruebas realizadas a la mezcla (incluye tanto la mezcla suelta como compactada).

El procedimiento para el diseño es el propuesto por la Universidad de Illinois (Marshall Modificado) y se toma como guía, el ejemplo Visualizado de diseño de mezclas asfálticas en frío de "FUNDALANAVIAL" Venezuela.

3.1 CARACTERIZACION DE LA EMULSION ASFALTICA.

La caracterización de la emulsión que se utilizó en este diseño de mezcla no se realizó, ya que para emulsificar el asfalto se requiere de una buena dosis de pericia en los ensayos, aparte de la manipulación de instrumentos complejos y de limitada existencia en los laboratorios del plantel, por tales motivos, se acordó tomar un tipo de emulsión fabricada por los técnicos de los laboratorios de la empresa ASFALCA S.A. de C.V., No obstante, el procedimiento y norma que ampara cada ensayo para la caracterización, se presenta a continuación de forma detallada, como también se muestra en el anexo 11 una representación esquemática de dicha caracterización.

3.1.1 ENSAYO RESIDUO POR DESTILACION (ASTM D 244, AASHTO T-59).

En este ensayo se destila una muestra de 200 g de la emulsión hasta una temperatura de 260 °C (500 °F). Se determina la proporción del residuo y a este material se le pueden realizar los ensayos de penetración, solubilidad, ductilidad, peso específico y cenizas para caracterizar el material asfáltico empleado.

A. APARATOS

A.1 Aparato de destilación compuesto por:

A.1.1 *Retorta de aleación de aluminio:* Una retorta cilíndrica, tal como se presenta en la Figura 3.1, de aproximadamente 241 mm (9 ½") de altura y 95 mm (3 ¾") de diámetro interior, provista de un mechero anular con orificios en su superficie interior para fijarlo alrededor de la parte exterior de la retorta. Las superficies de contacto entre la retorta y su tapa deben tener un acabado que proporcione un cierre lo más hermético posible.

A.1.2 *Tubo de desprendimiento:* Un tubo de desprendimiento de vidrio, de la forma indicada (ver figura 3.1), sirve de conexión entre el condensador y la retorta.

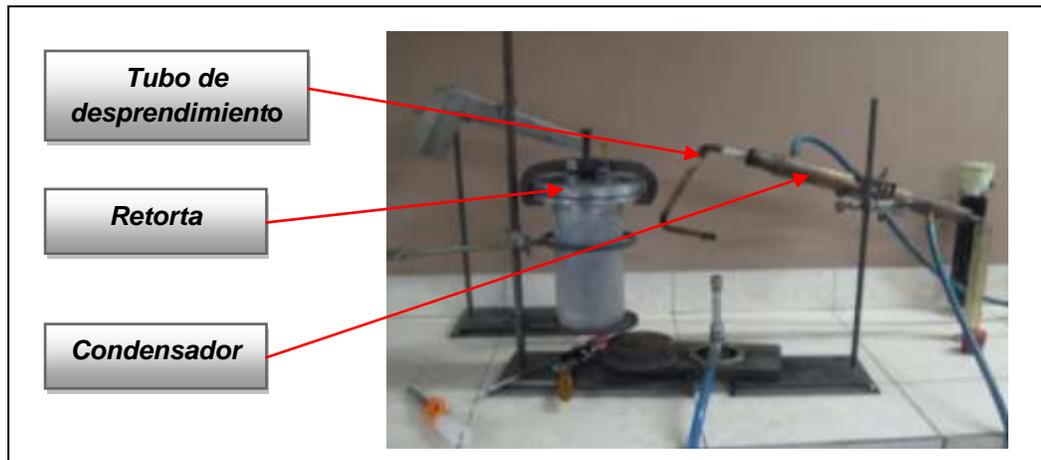


FIG.3.1 Aparatos utilizados en ensayo de destilación.

A.1.3 *Condensador*: Un elemento refrigerante recto, con camisa metálica.

A.1.4 *Probeta*: Una probeta con graduaciones cada 0.1 cm³, de 100 cm³ de capacidad.

A.1.5 *Protector de zinc*: Un protector de zinc para cubrir el tubo de desprendimiento, con la forma adecuada, como se observa en la Figura 3.2

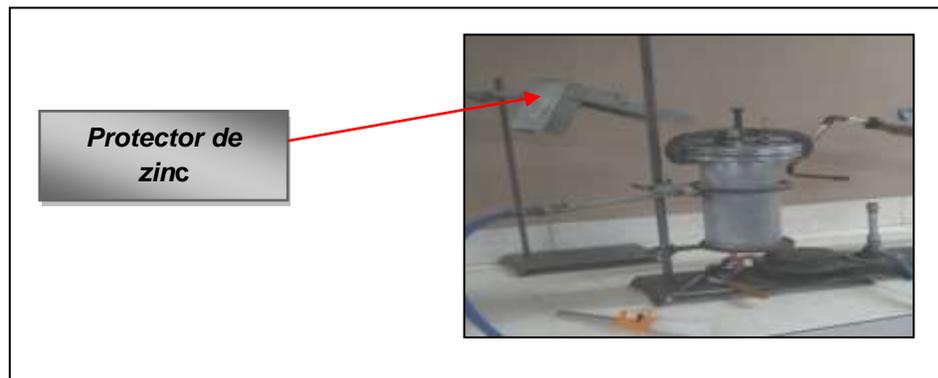


FIG 3.2 Forma del protector de el tubo de desprendimiento

A.2. Termómetros: Dos termómetros para destilación a baja temperatura de acuerdo con las siguientes características:

Referencia ASTM	Escala °C	Graduación °C	Longitud Total Mm	Error máximo °C
7C	-2a+300	1.0	386	0.5

A.3. Tamiz. Un tamiz con abertura de 300 mm (No. 50).

A.4 Balanza capaz de pesar 3 500 g con una precisión de ± 0.1 g.

B. PROCEDIMIENTO

B.1. Se monta el aparato, teniendo cuidado de que todas las conexiones queden en su lugar y bien ajustadas como se muestra en la figura 3.1.

B.2. Se pesan 200 ± 0.1 g de la emulsión en la retorta previamente tarada. En el tarado se incluyen la retorta, la tapa, la abrazadera, los termómetros y la junta de papel impregnada (empaquetadura) si se emplea.

B.3. Una junta de papel impregnada (empaquetadura) en aceite mineral puede emplearse entre la retorta y su tapa o también puede conseguirse el cierre por un acabado adecuado de las superficies de contacto. La tapa se aprieta firmemente sobre la retorta.

B.4. Los termómetros se acoplan en los agujeros más pequeños de la tapa por medio de tapones perforados, de manera que la parte inferior del bulbo de uno de ellos quede a una distancia de 6.4 mm (1/4") del fondo de la retorta y el bulbo del otro esté, aproximadamente, a una distancia de 165 mm (6 ½ ") del fondo de la retorta.

B.5. Se coloca el mechero anular alrededor de la retorta, aproximadamente a 152 mm (6") de su fondo. Se enciende este mechero y se ajusta de manera que se obtenga una llama pequeña.

También se calienta el tubo de desprendimiento por medio de un mechero Bunsen, provisto de mariposa, para evitar que el agua se condense en él.

B.6. Cuando pueda leerse la temperatura en el termómetro más bajo, aproximadamente a 215 °C (420 °F), se baja el mechero anular hasta una posición a nivel del fondo de la retorta. Se eleva la temperatura hasta 260 ± 5 °C (500 ± 10 °F) y se mantiene ésta durante 15 minutos. La destilación se

llevará a cabo en un tiempo de 60 ± 15 minutos desde el comienzo de la aplicación de calor.

Nota 1. La ubicación del mechero al comenzar el ensayo puede variarse según el desarrollo del mismo. Puede elevarse para disminuir el riesgo de formación de espuma o bajarse hasta la parte media de la retorta, cuando se ensayen emulsiones que no contengan disolventes. Un repentino cambio en la lectura del termómetro superior indica que hay espuma a la altura de su bulbo, debiendo en este caso parar el calentamiento hasta que cese la formación de espuma.

B.7. Inmediatamente después de terminado el período de calentamiento se pesa la retorta y accesorios, tal como se describe en el numeral B.2 y se anota el volumen de aceite destilado, con aproximación de 0.5 cm^3 , conservándolo si se necesita su identificación.

Nota 2. La retorta de aleación de aluminio pesa, debido al empuje del aire a esta temperatura, 1.5 g menos que a temperatura ambiente. Para corregir este error se añaden 1.5 g al peso obtenido al final del ensayo, antes de calcular el porcentaje de residuo por destilación.

B.8. Se quita la tapa de la retorta, se agita el residuo e inmediatamente se pasa este a través del tamiz de $300 \mu\text{m}$ (No. 50) a los moldes y recipientes adecuados para realizar los ensayos necesarios, dejando enfriar el residuo en éstos, sin cubrirlos, a la temperatura ambiente.

C. CALCULOS Y RESULTADOS

C.1. Cálculos y expresión de los resultados: Se calcula el porcentaje de residuo por destilación, así como el de aceite destilado, referidos al total de la emulsión, de acuerdo con las siguientes expresiones:

RESIDUO POR DESTILACION= _____

Siendo:

Pt = Peso retorta y accesorios.

Pi = Peso retorta y accesorios + emulsión.

Pf = Peso retorta y accesorios + residuo.

El % de aceite destilado se calcula con base en el volumen recogido en probeta, con la siguiente expresión:

Aceite destilado % = _____

Los resultados se expresarán con aproximación del 1%.

C.2. Precisión: El criterio siguiente se puede seguir para juzgar la aceptabilidad de los resultados, con el 95% de probabilidad.

Los resultados obtenidos por duplicado por el mismo operador se considerarán satisfactorios si no difieren en más de la siguiente cantidad:

Residuo por destilación % en peso Repetición % en peso	Residuo por destilación % en peso Repetición % en peso
De 50 a 70	1.0

Los resultados obtenidos por dos laboratorios se considerarán satisfactorios si no difieren en más de la siguiente cantidad:

Residuo por destilación % en peso	Residuo % en peso
De 50 a 70	2.0

3.1.2 ENSAYO RESIDUO POR EVAPORACION (ASTM D 244)

Mediante este ensayo se determina el porcentaje de asfalto que contiene una emulsión, evaporando el agua y pesando el residuo.

A. APARATOS

A.1. Vasos de vidrio: Vasos de vidrio resistentes al calor, de boca ancha, con capacidad de 600 cm³, Tres o cuatro según el procedimiento utilizado.

A.2. Varillas de vidrio. Varillas de vidrio de 6 mm (1/4") de diámetro y 180 mm (7") de longitud, con extremos redondeados.

A.3. Balanza. Una balanza de 500 g de capacidad y con una precisión de 0.1 gramos.

A.4. Estufa: Con control termostático capaz de mantener una temperatura de 163 ± 3 °C (325 ± 6 °F), con la forma y dimensiones que se describen en la norma para determinar pérdidas por calentamiento de aceites y compuestos asfálticos.

A.5. Tamiz: Un tamiz con aberturas de 300 mm (No. 50).

B. PROCEDIMIENTO

B.1. Procedimiento A. Este procedimiento se empleará cuando se necesite únicamente determinar el porcentaje de residuo de la emulsión.

Después de haber mezclado bien la emulsión, se pesan 50 ± 0.1 g de muestra en cada uno de los tres vasos, previamente tarado cada conjunto de vasos y varillas. Se colocan los vasos en el horno, cuya temperatura se ha regulado a 163 ± 3 °C (325 ± 6 °F), y se dejan durante 2 horas.

Seguidamente, se retiran del horno y se remueve cuidadosamente y se deja en el horno durante 1 hora, sacándolos a continuación y dejándolos enfriar a la temperatura ambiente antes de pesarlos bien el residuo.

B.2 Procedimiento B. Este procedimiento se emplea cuando es necesario realizar, con el residuo obtenido, ensayos adicionales.

El procedimiento es similar al anterior pero utilizando cuatro muestras de 50 ± 0.1 g.

Después de determinar el porcentaje de residuo, se introducen de nuevo los vasos en el horno hasta que el residuo asfáltico esté lo suficientemente fluido, para pasar a través del tamiz de 300 μm (No.50), lo cual lleva normalmente de 15 a 30 minutos.

El material que pasa el tamiz se vierte directamente en los recipientes o moldes que se vayan a emplear en los ensayos sobre el residuo, dejándolos enfriar a la temperatura ambiente, sin cubrirlos, antes de proceder a su ensayo.

Los valores de la penetración y de la ductilidad del residuo obtenido, siguiendo este método, suelen ser inferiores a los que se obtienen cuando el residuo ensayado es el obtenido en el ensayo de destilación de emulsiones asfálticas, norma MTC E 401. Si los resultados obtenidos al ensayar el residuo cumplen esos requisitos, el material puede aceptarse. En el caso de no cumplir los resultados, no puede rechazarse el material, sino que hay que volver a determinar sus características sobre el residuo obtenido del ensayo de destilación de emulsiones asfálticas.

C. CALCULOS Y RESULTADOS

C.1 Cálculos: Tanto en el caso del procedimiento A como el B se calcula el porcentaje de residuo en cada vaso de la siguiente manera:

$$\text{Residuo \%} = 2 (A - B)$$

Siendo:

$$A = \text{Peso del vaso} + \text{varilla} + \text{residuo}$$

$$B = \text{Peso del vaso} + \text{varilla}$$

C.2. Expresión de los resultados: El resultado será el promedio de las determinaciones, expresándolo con aproximación del 0.1%.

C.3. Precisión: Deberá emplearse el siguiente criterio para juzgar la aceptabilidad de los resultados, con el 95% de probabilidad. Ensayos duplicados realizados por el mismo operador se considerarán aceptables, si no difieren en más de la siguiente cantidad:

Residuo por evaporación % en peso	Repetición % en peso
De 50 a 70	0.4

Los resultados obtenidos por dos laboratorios se considerarán aceptables, si no difieren en más de la siguiente cantidad:

Residuo por evaporación % en peso	Reproducción % en peso
De 50 a 70	0.8

3.1.3 ENSAYO DE SEDIMENTACION (ASTM D 244).

Mediante este ensayo se valora la sedimentación que se produce durante el almacenamiento de las emulsiones asfálticas.

A. APARATOS

A.1. Probetas: Dos probetas de vidrio, con base y tapón, de 500 cm³ de capacidad, con diámetro exterior de 5.0 ± 0.5 cm y graduadas cada 5 cm³ hasta la capacidad total.

A.2. Pipeta: Una pipeta de vidrio, de 60 cm³ de capacidad o un sifón de la forma más conveniente.

A.3 Vasos: Cuatro vasos de vidrio de boca ancha (beaker), resistentes al calor y de 600 cm³ de capacidad.

A.4. Estufa: Un horno igual al que se describe en la norma de pérdidas por calentamiento de aceites y compuestos asfálticos.

A.5. Balanza con capacidad de 500 g y precisión de ± 0.1g.

Nota 1. Puede utilizarse una probeta provista de dos salidas laterales a los niveles adecuados para la toma de las muestras.

B. PROCEDIMIENTO

B.1 Colocar una muestra representativa de 500 ml en cada una de las probetas, se tapan herméticamente y se dejan en un lugar del laboratorio en completo reposo. Al final del tiempo especificado, cinco (5) días, se sacan, por medio de la pipeta o el sifón, 55 cm³ de la parte superior de cada beta, procurando no alterar el resto de la muestra. Después de homogenizar independientemente las dos muestras tomadas, se pesan, exactamente 50 g de cada una de ellas en dos vasos de vidrio de boca ancha, de 600 cm³, previamente tarados y se someten durante dos (2) horas a la temperatura de 163 °C (352 °F) en el horno.

Se dejan enfriar las muestras y se pesan con precisión de 0.1 g para determinar el residuo por evaporación.

B.2 Después de sacar las muestras de la parte superior, se extraen cuidadosamente, con sifón o pipeta aproximadamente 390 cm³ de cada una de las dos probetas. El resto de material que queda en ellas se homogeniza y se pesan exactamente 50 g de cada una de ellas en vasos de vidrio de 600cm³, determinándose los residuos por evaporación en la misma forma indicada en el numeral B.1.

C. CALCULOS Y RESULTADOS

C.1 Cálculos. Se calcula el residuo por evaporación en porcentaje respecto a la muestra total, para cada una de las cuatro determinaciones realizadas.

Se hace el promedio de las determinaciones, correspondientes a las muestras tomadas de la parte superior de las probetas y de las correspondientes a las muestras tomadas de la parte inferior de las mismas.

La diferencia en valor absoluto entre los dos promedios antes determinados, según la expresión que aparece adelante, es el resultado del ensayo de sedimentación.

$$\text{Sedimentación \% (5 días)} = (P_{i1} + P_{i2}) - (P_{s1} + P_{s2})$$

Siendo:

P_i = Pesos del residuo parte inferior

P_s = Pesos del residuo parte superior

C.2. Expresión de los resultados. Los resultados se expresarán con aproximación al porcentaje entero más próximo.

C.3 Precisión: Deberá emplearse el siguiente criterio para juzgar la aceptabilidad de los resultados:

Ensayos duplicados realizados por el mismo operador se considerarán aceptables si no difieren en más de la siguiente cantidad:

Sedimentación % en peso	Repetición
DE 0 A 10	0.4 % en peso
Superior a 1.0	5% de la media

Los resultados obtenidos por dos laboratorios se considerarán aceptables si no difieren más de la siguiente cantidad:

Sedimentación % en peso	Repetición
DE 0 A 10	0.8 % en peso
Superior a 1.0	10% de la media

D. OBSERVACIONES

D.1 Es imprescindible que en el lugar elegido para dejar las probetas, éstas no sufran golpes ni vibraciones.

D.2 Hay que tener el máximo cuidado al sifonar las muestras de la parte superior para no alterar el resto del contenido de las probetas.

3.1.4 ENSAYO DE LA CARGA ELECTRICA (ASTM D 244).

El ensayo está basado en la diferente carga eléctrica, negativa o positiva, que poseen las partículas bituminosas en las emulsiones aniónicas o catiónicas, y consiste en introducir en la emulsión una pareja de electrodos unidos a una fuente de alimentación de corriente continua, observando, al cabo de un tiempo, en que electrodo se ha depositado la película de ligante (ver figura 3.3)

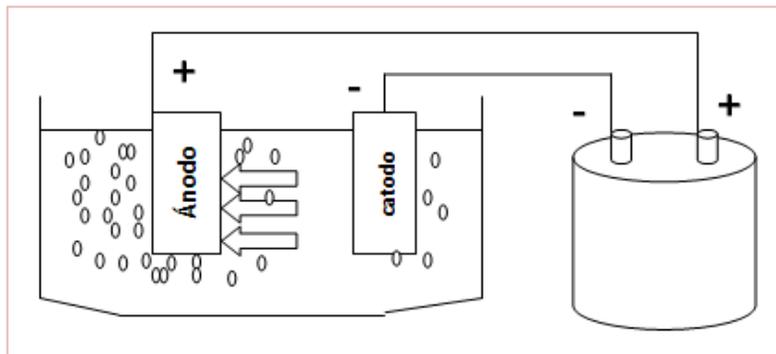


FIG 3.3 Esquema de ensayo de carga eléctrica de una emulsión.

A. APARATOS Y MATERIALES

A.1. Fuente de corriente continua: Dispositivo de alimentación eléctrica de corriente continua de 12 V, provisto de un miliamperímetro y una resistencia variable.

A.2. Electrodo: Dos placas de acero inoxidable, de 25 mm de ancho y 101.6 mm de largo, aisladas entre si y montadas en un dispositivo que las mantenga rígidamente paralelas, a una distancia de 13mm.

A.3. Vasos de vidrio: Vasos de vidrio de 150 ó 250 cm³ de capacidad.

Nota 1. Para regular la profundidad de inmersión de los electrodos, éstos deben llevar una muesca o señal de enrase a 25 mm de su extremo.

B. PROCEDIMIENTO

B.1. La muestra de emulsión se vierte en un vaso de vidrio en cantidad tal que permita sumergir 25mm los electrodos dentro de ella.

B.2. Se montan los electrodos, previamente limpios y secos, y se introducen en la emulsión hasta la señal de enrase de 25 mm.

B.3. Se conectan los electrodos a la fuente de alimentación y se ajusta la intensidad de la corriente, mediante la resistencia variable, hasta unos 8 mA, poniendo en marcha al mismo tiempo un reloj.

Nota 2. Los 8 mA es un valor mínimo de corriente, pudiendo establecerse niveles de mayor intensidad. Debe anotarse la intensidad de la corriente empleada.

B.4. Cuando la intensidad de la corriente baje a 2 mA o hayan transcurrido 30 minutos, se desconecta la corriente, desmontar los electrodos y se lava con agua.

B.5. Finalmente, se observa el depósito que queda en los electrodos; una emulsión catiónica producirá un depósito apreciable de ligante en el cátodo (electrodo negativo), mientras que el ánodo (electrodo positivo), permanecerá limpio. Por el contrario, en una emulsión aniónica el depósito aparecerá en el ánodo, permaneciendo el cátodo limpio.

C. RESULTADOS

C.1 El resultado expresará que la carga de la partícula es "positiva", si la película de ligante se deposita en el cátodo, y "negativa", si se deposita en el ánodo.

3.1.5 VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL (ASTM D 244).

Describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la viscosidad o consistencia de las emulsiones asfálticas por medio del viscosímetro Saybolt Furol.

Las determinaciones se realizan a 25 °C o 50 °C (77 o 122 °F), pudiendo emplearse el viscosímetro, aún en el caso en que el tiempo empleado para fluir, sea menor de 20 segundos.

A. APARATOS

A.1 Viscosímetro: Un viscosímetro del tipo Saybolt Furol, semejante al utilizado para ensayos de viscosidad Saybolt en otros materiales asfálticos (MTC E 309) con sus aditamentos.

A.2 Tamiz: Un tamiz de tamaño adecuado con abertura de 850 mm (No. 20).

A.3 Baño de agua: Que permita mantener la temperatura a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{F}$) y a $71 \pm 2.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($160 \pm 4.5\text{ }^{\circ}\text{F}$)

A.4. Cronómetro

B. PROCEDIMIENTO

B.1 Ensayo a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($77\text{ }^{\circ}\text{F}$). (Para emulsiones con porcentaje de agua mayor del 35%).

1. Se agita bien la muestra para que no se formen burbujas y viértala en un frasco de 100 cm³, el cual se coloca en un baño de agua a la temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($77 \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{F}$) durante 30 min., mezclando al final la muestra, para lo cual se invierte el frasco varias veces, pero lentamente para evitar que se forme espuma.
2. Vierta la muestra dentro del viscosímetro a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y haberla agitado, se echa en el viscosímetro bien limpio, una pequeña cantidad a través del tamiz de 850 mm (No. 20), dejando que fluya por el tubo de salida para el desperdicio.
3. Coloque el tapón, el cual debe estar unido a un cordel que facilite su remoción, en la cámara de aire del viscosímetro; se vierte la muestra a través del tamiz de 850 mm (No. 20) directamente en el tubo del viscosímetro hasta que sobrepase el borde de rebose del tubo.
4. Se agita la muestra con un termómetro de viscosidad equipado con soporte, mediante un movimiento circular de 30 a 50 rpm en el plano horizontal, hasta que la temperatura de la emulsión alcance la del ensayo y permanezca durante un minuto dentro de $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ de la misma.

5. Se saca el termómetro de la muestra y se retira la emulsión de la galería utilizando la pipeta extractora, hasta que quede por debajo del borde de rebose, teniendo especial cuidado para que la punta de la pipeta no lo toque.
6. Se coloca el frasco receptor de tal manera que la emulsión que cae del viscosímetro golpee el cuello del mismo.
7. Se retira rápidamente el tapón del fondo del viscosímetro y en el mismo instante se pone en funcionamiento el cronómetro, el cual se detiene en el momento en que el fondo del menisco alcance la marca de graduación del frasco receptor, anotándose la lectura del cronómetro.

B.2 Ensayo a 50 °C (122 °F). (Para emulsiones con porcentaje de agua igual o menor del 35%).

1. Se agita bien la muestra sin incorporar burbujas y se echan unos 100 cm³ en un vaso de vidrio de 400 cm³. El vaso con la emulsión se sumerge en un baño de agua, de manera que el fondo quede a 50 mm de la superficie y se mantiene en posición vertical. La temperatura del baño debe ser de 71 ± 2.5 °C (160 ± 4.5 °F).
2. Con objeto de obtener una distribución uniforme de la temperatura, se agita la emulsión con el termómetro del viscosímetro mediante un movimiento circular de 60 vueltas por minuto (el termómetro deberá ir tocando las paredes y el fondo del vaso). Se tendrá cuidado para no producir burbujas.
3. La emulsión que se va a ensayar se calentará, dentro del baño, mantenido a la temperatura de 71 ± 2.5 °C, hasta que alcance 51.5 ± 0.3 °C.
4. Se coloca el tapón conforme se indicó en el numeral B.1. Una vez que la emulsión alcance la temperatura indicada, se vierte inmediatamente a través del tamiz de 850 µm (No. 20), en el tubo del viscosímetro, hasta que rebose en la galería del aparato.

5. La emulsión se sigue agitando con el termómetro, con las mismas revoluciones hasta alcanzar la temperatura del ensayo. Se tendrá cuidado para no producir burbujas durante la agitación. La temperatura del baño se regula para lograr que la emulsión se mantenga, por lo menos durante 1 minuto, a $50 \pm 0.05^\circ \text{C}$ ($122 \pm 0.09^\circ \text{F}$).

3.1.6 TAMIZADO DE LAS EMULSIONES ASFALTICAS EN LA MALLA # 20 (ASTM D 244).

Mediante este ensayo se determina la cantidad de producto asfáltico mal emulsionado que hay en la emulsión. Los grumos, así como la película que se forma en la parte superior, pueden ser debidos a la rotura de la emulsión, contaminaciones, mala fabricación, etc.

A. APARATOS Y MATERIALES

A.1. Tamiz: Un tamiz de abertura $850 \mu\text{m}$ (No. 20), montado sobre un bastidor de unos 80 mm de diámetro, provisto de un aro que sirva de soporte para mantenerlo sobre un vaso o recipiente apropiado.

A.2. Fondo: De tamaño apropiado para acoplarse a la parte inferior del tamiz.

A.3. Solución de oleato sódico (2%): Disolver 2 g de oleato de sodio pero en agua destilada y completar a 100 ml.

A.4. Solución de emulsionante catiónico: Una solución de emulsionante catiónico al 2% en agua destilada.

A.5. Balanza: con capacidad de 2000g con precisión de ± 1 gr. y 500 g con precisión de ± 0.1 g y 500g con precisión de ± 0.1 g.

B. PROCEDIMIENTO

B.1. La temperatura a la cual la prueba de tamiz debe ser efectuada esta relacionada con la viscosidad de la emulsión. Para aquellos materiales cuya viscosidad es 100 s ó más a 25°C realizar el ensayo a temperatura ambiente y

para aquellos materiales cuya viscosidad es más de 100 s a 25°C y aquellos cuya viscosidad es especificada a 50°C (122° F), use una temperatura de ensayo a 50°C si es necesario calentar, la muestra, puede ser colocada en un horno a baño de agua, agitando para alcanzar su homogeneidad.

B.2 Se taran el tamiz y el fondo: Después de tarados se moja la malla del tamiz con solución de oleato sódico o de emulsionante catiónico, según el tipo de emulsión que se ensaya, sea aniónica o catiónica. Se pesan 1000 g de la emulsión en un recipiente y se hacen pasar a través del tamiz. El recipiente y el residuo que queden en el tamiz se lavan perfectamente con la misma solución, hasta que el líquido de lavado salga de color claro. Se coloca entonces el fondo debajo del tamiz y se calienta durante 2 horas en un horno regulado a 105 °C (221° F). Se deja enfriar en un desecador y se pesa.

C. CALCULOS Y RESULTADOS

C.1. Cálculos: Se calcula el porcentaje de muestra retenido en el tamiz de la manera siguiente:

$$\text{Muestra retenida \%} = \frac{A}{B} \times 100$$

Donde:

A = Peso del tamiz y el fondo, en gramos.

B = Peso del tamiz, el fondo y residuo, en gramos.

C.2. Expresión de los resultados: Los resultados se expresarán en porcentaje en peso de residuo retenido en el tamiz, respecto a la muestra total, con aproximación del 0.01%:

Si el residuo es menor de 0.1 %, informar el resultado como "menor de 0.1%".

C.3. Precisión: Deberá emplearse el siguiente criterio para juzgar la aceptabilidad de los resultados (95% de probabilidad): Ensayos duplicados

realizados por el mismo operador se considerarán aceptables si no difieren en más de la siguiente cantidad:

Ensayo de tamizado % en peso	Repetición% en peso
De 0 a 0.1	0.03

Los resultados obtenidos por dos laboratorios se considerarán aceptables, si no difieren en más de la siguiente cantidad:

Ensayo de tamizado % en peso	Repetición% en peso
De 0 a 0.1	0.08

D. OBSERVACIONES

D.1 Es imprescindible un buen lavado del residuo que queda en el tamiz con la solución adecuada.

D.2 No se debe sobrecalentar el residuo durante la desecación.

D.3. El resultado del ensayo queda afectado por la toma de la muestra: Si la muestra se toma en la boquilla de un distribuidor, hay que evitar que se forme espuma. Si se toma en un tanque, no se debe coger la película que sobrenada en la superficie.

3.1.7 ENSAYO DETERMINACION DEL POTENCIAL DE HIDROGENO (PH) (ASTM D 244).

El ensayo mide el pH existente en la fase acuosa de las emulsiones fabricadas con cemento asfáltico o asfalto líquido (con disolventes).

El método se basa en medidas de la diferencia de potencial, expresadas en unidades de pH, entre dos electrodos (referencia y medida).

A. APARATOS Y MATERIALES

A.1. pH-metro: Se empleara un pH-metro con toda la banda de pH (0 a 14), equipado con dispositivo corrector de temperatura.

A.2. Electrodo: Electrodo de referencia de calomelanos, con solución saturada de cloruro potásico, electrodo de medida de vidrio.

Electrodo combinado (referencia y medida en uno solo), en sustitución de los dos anteriores.

A.3. Soluciones de calibración

- ❖ Solución tampón ácida de pH conocido (aproximadamente 4) entre 20 y 30 °C (68 y 86 °F).
- ❖ Solución tampón básica de pH conocido (aproximadamente 9) entre 20 y 30 °C (68 y 86 °F).
- ❖ Solución tampón neutra de pH conocido (aproximadamente 7) entre 20 y 30 °C (68 y 86 °F)

Nota 1. Las tres soluciones tampón deben conservarse en frascos de polietileno.

A.4. Vasos de vidrio de 100 cm³.

B. PROCEDIMIENTO

B.1 Calibración del pH-metro. Se coloca el mando de temperatura en aquella a la cual se va a realizar el ensayo (temperatura del líquido). Se sumergen los electrodos (**Nota 2**) en la solución tampón apropiada (ácida para las catiónicas y básica para las aniónicas), utilizando vasos de 100 cm³.

Se ajusta la lectura al pH de la solución tampón, con el mando corrector. Se lavan los electrodos con agua destilada abundante (**Nota 3**).

B.2. Se ponen unos 50 a 75 cm³ de la emulsión que se va a ensayar, en un vaso de vidrio de 100 cm³; se sumergen los electrodos, se espera a que se estabilice la lectura del aparato y se toma nota de ella.

B.3. Se lavan los electrodos con agua destilada y se realiza una nueva medida del pH de la solución tampón usada en el numeral B.1, para calibrar el aparato.

B.4. Finalmente se procede a la limpieza total de los electrodos. Primero se enjuagan con acetona, limpiándolos seguidamente con un disolvente (tricloroetileno) hasta la eliminación total del ligante depositado; después de otro lavado con acetona se enjuaga con abundante agua destilada, finalizando con un secado total del electrodo.

B.5. Todas las medidas se deberán realizar entre 20 y 30 °C (68 y 86 °F). Indicar, en el resultado final, la temperatura a la cual se realizó el ensayo.

B.6. Cuando se desconozca la naturaleza de la emulsión problema (ácida o básica), se calibrará el aparato con la solución de pH neutro y se procederá con la medida de pH de la emulsión que se ensaya, siguiendo el proceso descrito, repitiéndolo posteriormente con la solución tampón apropiada, siguiendo los numerales B.1, B.2, B.3 y B.4.

Nota 2. En ningún caso deberán sumergirse los electrodos hasta un nivel superior al que tiene la solución saturada en el interior del electrodo de referencia, con el fin de evitar la posible penetración de líquidos extraños por el orificio capilar, que deberá estar siempre abierto durante las mediciones.

Nota 3. Siempre debe mantenerse el electrodo en posición vertical y el bulbo del electrodo en la parte inferior.

C. RESULTADOS

C.1. El resultado del valor del pH medido, se expresará con aproximación al décimo.

C.2 Deberá emplearse el siguiente criterio para juzgar la aceptabilidad de un resultado. La diferencia entre los valores de pH en la calibración inicial

(numeral B.1) y final (numeral B.3) no deberá exceder a 0.2 unidades de pH. Ensayos duplicados se consideran satisfactorios si no difieren en más de 0.3 unidades de pH.

3.1.8 ENSAYO DE MISCIBILIDAD CON AGUA (ASTM D 244).

Mediante este ensayo se determina si se produce coagulación cuando se diluye la emulsión con agua.

Se emplean dos procedimientos: el primero, de estimación visual, aplicable a emulsiones de rotura rápida; y el segundo, cuantitativo, aplicable a las emulsiones de rotura media y lenta.

A. APARATOS

A.1. Probeta. Una probeta graduada de 50 cm³.

A.2. Vaso. Un vaso de vidrio de boca ancha (beaker), de 400 cm³.

A.3. Tubos de vidrio. Tres tubos de vidrio de 7 mm de diámetro externo, 5 mm de diámetro interno y 150 mm (6"), de longitud, con un corcho.

A.4. Soporte. Una tira de metal o madera de aproximadamente 150 mm (6") de largo, 25 mm (1") de ancho y 5 mm de diámetro interno, con un agujero de 10 mm (2/5") de diámetro en el centro.

A.5. Crisoles. Tres crisoles de porcelana de 15 a 25 cm³ o tres vasos de vidrio resistentes al calor de 30 cm³.

A.6. Estufa. Un horno igual al que se describe en la norma de pérdidas por calentamiento de aceites y compuestos asfálticos.

A.7. Balanza. Una balanza analítica con sensibilidad de 0.1 mg.

B. PROCEDIMIENTO

B.1. Primer método. Medir en una probeta 50 cm³ de emulsión, vertiéndolos en un vaso de vidrio de 400 cm³. Medir también por medio de una probeta 150 cm³ de agua destilada, añadiéndolos gradualmente a continuación sobre la emulsión mientras se está agitando. La temperatura, aunque no afecta

de manera importante al ensayo, deberá estar comprendida entre 20 y 25 °C (68 y 77 °F).

Después de haber homogenizar la mezcla, se deja en reposo durante dos horas, pasadas las cuales se observa visualmente si se ha producido coagulación del asfalto que contiene la emulsión.

B.2 Segundo método. Se taladran tres corchos, se introducen los tubos de vidrio en los agujeros y se miden 200 cm³ de agua destilada entre, 20 y 25 °C (68 y 77 °F), dentro del vaso de 400 cm³.

Colocando la tira de soporte atravesada sobre el borde del vaso, se inserta el primer tubo en el agujero ajustando la posición del corcho, de tal manera que cuando el corcho descansa sobre la tira, el extremo inferior del tubo quede sumergido en el agua 10 mm (2/5") por debajo de la superficie. De la misma forma, se ajusta el segundo tubo hasta una profundidad de 25 milímetros (1"). El tercer tubo se ajustará de manera que su extremo inferior este entre 1 y 1.5 mm del fondo del vaso.

Nota 1. Debido a que los vasos comerciales tienen diferentes alturas, es necesario reajustar los tubos cada vez que se usa un vaso diferente.

Se miden por medio de la probeta graduada 50 cm³ de la emulsión, a la temperatura de 20 a 25 °C (68 a 77 °F) y se pasan al vaso de 400 cm³. Se lava la probeta con tres porciones sucesivas de agua destilada de 50 cm³ cada una, a una temperatura comprendida entre 20 y 25 °C (68 a 77 °F) y se añaden los lavados al vaso, quedando el volumen final de la mezcla en 200 cm³. Se agita la emulsión y el agua con una varilla de vidrio hasta que la mezcla sea uniforme, se cubre el vaso con un vidrio de reloj y se determina en reposo durante 2 horas.

Se pesan los tres crisoles o los tres vasos de 30 cm³, con un vidrio de reloj para cada uno, con precisión de 0.1 mg. Después de que la emulsión diluida haya estado en reposo las 2 horas, se quita el vidrio de reloj, se coloca la tira de

soporte atravesada sobre el borde del vaso, se toma una muestra de aproximadamente 1 g de la parte superior y se pasa a uno de los crisoles, empleando como pipeta el tubo que penetra 10 mm. Para ello se tapa el tubo con el dedo, se introduce a la profundidad indicada, se quita el dedo, dando lugar a que la emulsión suba por el tubo y se vuelve a tapar con el dedo mientras se retira el tubo con su contenido. Después de sacar el tubo y antes de pasar la muestra al crisol, se seca el líquido adherido a la parte exterior con un papel de filtro.

De la misma manera se toman otras dos muestras de la parte media y del fondo de la emulsión diluida, empleando el segundo y tercer tubo, respectivamente. Se pesan los crisoles con las muestras de emulsión tapados por el vidrio de reloj, y se determina el peso de cada una de las muestras por diferencia. Los crisoles se cubren con el vidrio de reloj para hacer más lenta la evaporación. Una vez pesados, se retiran los vidrios de reloj y se colocan los crisoles con las muestras en el horno, sometiéndolos a una temperatura de 163 °C (325 °F) durante 2 horas. Se retiran del horno una vez transcurridas las dos horas, se dejan enfriar en un desecador y se pesan de nuevo cubiertos.

C. CALCULOS Y RESULTADOS

C.1 Primer método. En el primer método se expresará únicamente si se ha producido o no coagulación después de dos horas.

C.2 Segundo método. Se calcula el residuo en porcentaje para cada una de las muestras tomadas a distinto nivel.

Residuo% = ———

Donde:

P = Peso del crisol + vidrio de reloj

Pi = Peso del crisol + vidrio de reloj + muestra

Pf = Peso del crisol + vidrio de reloj + residuo

Si el ensayo se ha hecho por duplicado, se halla el promedio de los residuos para cada uno de los niveles. Se calculan las diferencias numéricas entre los residuos de los tres niveles, dos a dos.

Se expresará como resultado del ensayo, la máxima diferencia numérica obtenida entre dos cualesquiera de los tres niveles. El resultado se expresará con aproximación del 0.1%.

3.2 CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS.

En las superficies de pavimentos el agregado contribuye a su estabilidad mecánica, ayuda a soportar el peso del tráfico y al mismo tiempo transmite las cargas a la base a una presión unitaria reducida. Esto hace necesario realizar la respectiva caracterización de los mismos, con la ayuda de los ensayos que aparecen regulados en las normas técnicas ASTM y AASHTO, esta se describe de forma ordenada en el organigrama en la parte de anexo (ver anexo 11).

A continuación se desarrollan las pruebas de laboratorio a las cuales deberán ser sometidos los materiales pétreos, no sin antes detallar algunas generalidades de éstos.

3.2.1 ANÁLISIS DEL MATERIAL PETREO.

Este análisis se vuelve necesario, para obtener valores representativos en cuanto a sus propiedades y características físicas, para poder aceptarlos o adatarlos al proyecto según los requerimientos de calidad.

Por ello para la exploración de las propiedades del pétreo, es importante poseer muestras representativas que reflejen las condiciones del mismo en el sitio, esta actividad puede realizarse de dos formas: obteniendo muestras inalteradas y obteniendo muestras alteradas. A una muestra se le llama inalterada, cuando se toman todas las precauciones necesarias para

mantener las mismas condiciones que tenían en el lugar de procedencia, y alterada, en caso contrario.

Las muestras de agregado pétreo que se utilizarán para la investigación se obtuvieron en condiciones alteradas estas son procedentes de canteras de rocas andesíticas trituradas en planta.

3.2.2 UBICACIÓN DEL SITIO DE OBTENCION DE LAS MUESTRAS.

El banco de materiales donde se extrajeron las muestras (grava 3/4" y arena triturada) que se emplearan para el diseño de la mezcla, se encuentra ubicado en el municipio de San Diego en el Departamento de La Libertad, comúnmente llamado "La Cantera".

3.2.3 TAMAÑO DE LAS MUESTRAS

El tamaño de estas puede estimarse empíricamente por la cantidad de briquetas a fabricar, sin embargo, para una adecuada selección del tamaño de las muestras obtenidas en campo se recomienda tomar los pesos mínimos dependiendo el T.M.N (Tamaño Máximo Nominal) sugerido por la norma AASHTO T-168 como se detalla en el cuadro 3.1.

CUADRO 3.1 Tamaños mínimos de Muestras en base al T.M.N

TAMAÑO MAXIMO NOMINAL DE LOS AGREGADOS QUE PASAN POR EL TAMIZ	PESO MINIMO DE LA MUESTRA NO COMPACTADA Kg. (Lb)
2.36 mm (No 8)	1.8 (4)
4.75 mm (No 4)	1.8(4)
9.5 mm (3/8")	3.6(8)
12.5 mm (1/2")	5.4(12)
19 mm (3/4")	7.3(16)
25 mm (1")	9.1(20)
37.5 mm (1½")	11.3(25)
50 mm (2")	15.9(35)

FUENTE: Norma AASHTO T -168.

Las muestras se almacenan en sacos (Ver fig. 3.4) con su debida identificación. Se alojan en un lugar apropiado hasta que se realizan los

ensayos pertinentes, cuidando mantener el pétreo en condiciones como se obtuvo en el banco de material.



FIG. 3.4 Almacenamiento de Muestras en sacos con su debida identificación.

3.2.4 ENSAYO GRANULOMETRICO PARA AGREGADOS PETREOS. (AASHTO T 27 – 93 y ASTM D 136).

Una muestra de material seco con peso conocido, es separada utilizando una serie de mallas progresivamente más pequeñas con el objeto de llegar a determinar la distribución de los tamaños que contiene el material.

Para la realización del ensayo, se utilizo la técnica de lavado previo por la malla # 200, para determinar exactamente la cantidad de material mas fino que pasa por dicho tamiz. La prueba se realiza por medio del cribado de los materiales a través de diferentes mallas (ver figura 3.5), a lo cual se conoce como: Análisis Granulométrico Mecánico.



FIG 3.5 Juego de Tamices Estándares.

A. MATERIAL Y EQUIPO.

- Juego de tamices estándares.
- Agitador mecánico (Mechanical Sieve Shaker)
- Balanza de precisión de 0.1 gr.
- Balanza de precisión de 1.0 gr.
- Horno eléctrico.
- Equipo misceláneo. (brochas para limpieza, cepillo, espátulas de 4”, charolas de lamina galvanizada, palas manuales)

El material necesario para realizar la prueba se calcula como se indica en el cuadro 3.2 que a continuación se presenta.

CUADRO 3.2 Peso de la muestra en función del tamaño máximo (Φ Max) del agregado.

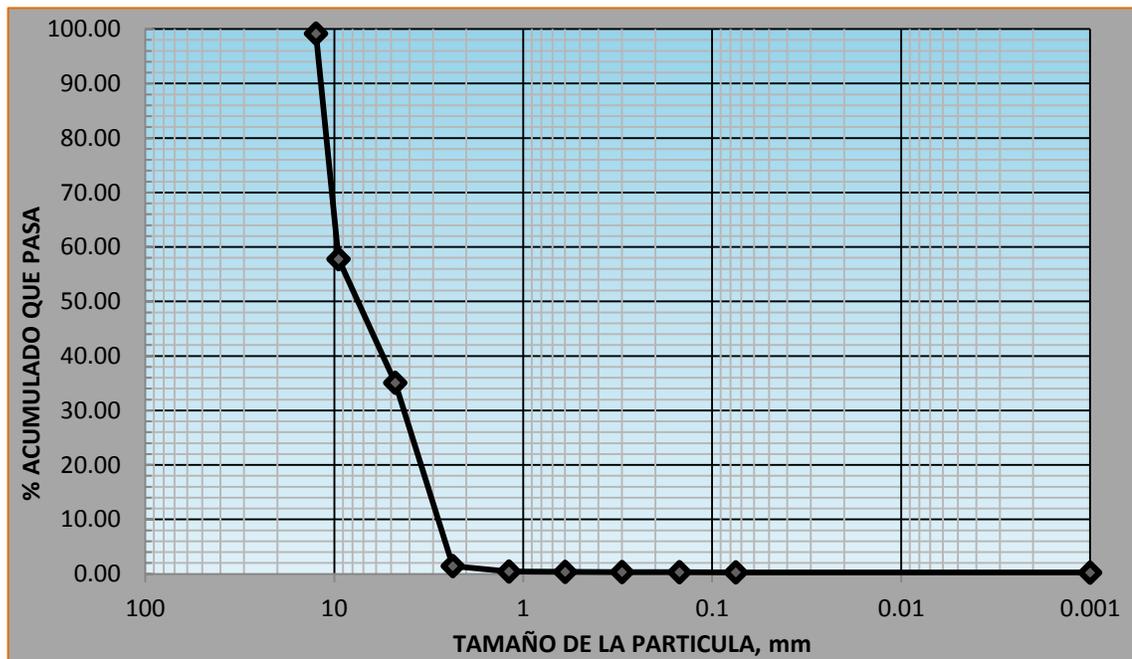
AGREGADO FINO	
Mínimo, el 95% pasa la malla N° 8	100 g
Mínimo, el 85% pasa la malla N° 4 y mas del 5% retiene la malla N° 8	500 g
AGREGADO GRUESO	
Tamaño Máximo Nominal mm (in)	Peso de la Muestra de ensayo, mínimo, Kg (Lb)
9.5 (3/8)	1(2)
12.5 (1/2)	2 (4)
19.0 (3/4)	5(16)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1½)	15 (33)
50.0 (2)	20 (44)
63.0 (2½)	35 (77)
75 (3)	60 (130)
90.0 (3½)	100 (220)
100 (4)	150 (330)
112.0 (4½)	200 (440)
125.0 (5)	300 (660)
150.0 (6)	500 (1100)

FUENTE: Trabajo de Grado “Propuesta de manual para la asignatura Laboratorio de Pavimentos en la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador”.

B. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO PARA AGREGADO GRUESO.

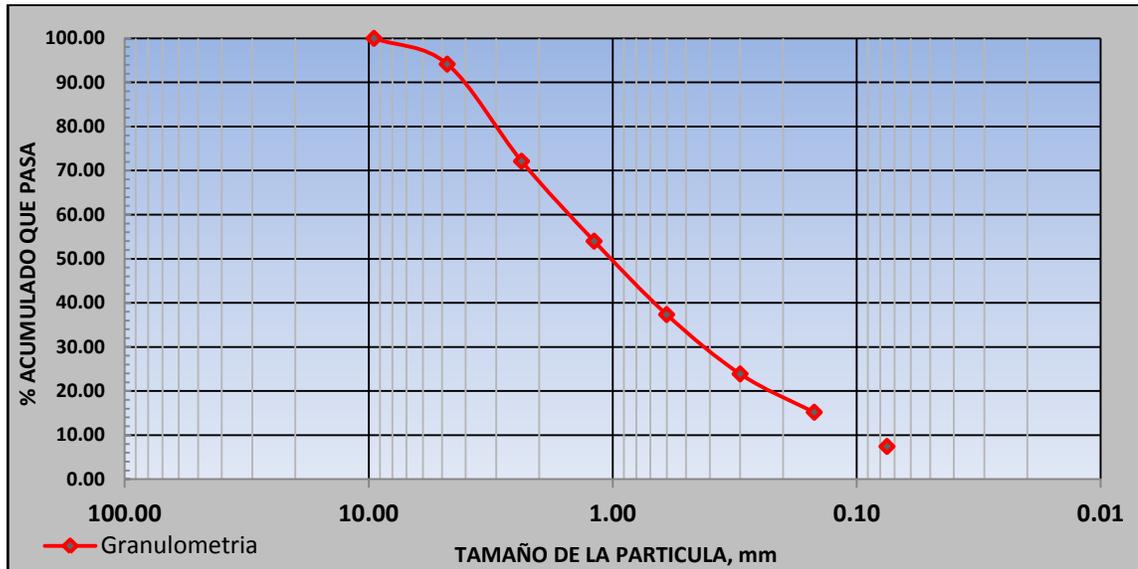
1. Tomar de un cuarteo la cantidad de material hasta obtener una muestra adecuada, según cuadro 3.2 Luego exponer la muestra de pétreo grava $\frac{3}{4}$ " a los rayos del sol o secar en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C y chequear constante mente el peso en una balanza de precisión hasta lograr un registro constante de su peso y anotar este dato en el cuadro correspondiente como Peso inicial sin lavar (Todas las anotaciones se realizan en el cuadro presentado en Anexo 1).
2. Lavar el peso obtenido de material a través de la malla N° 200, con el fin de eliminar eficientemente los finos del material procurando no perder partículas de pétreo (grava), este estará bien lavado hasta que el agua que pasa a través de la malla se mantenga transparente.
3. Una vez el material este bien lavado se coloca dentro de un horno en un periodo de 18 a 24 horas a una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C.
4. Transcurrido este tiempo se pesa de nuevo el material y se anota en el cuadro correspondiente como Peso seco de la muestra después de lavado. Para obtener el peso de los finos por lavado se efectúa la diferencia de (Peso inicial sin lavar) – (Peso seco lavado), este valor se anota como peso de material fino por lavado.
5. Luego se procede al tamizado del Peso seco de la muestra después de lavado, este puede realizarse con vibrador mecánico (suelen utilizarse 15 minutos de vibrado) o manualmente (30 minutos), usando las mallas $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100, N° 200 y anotar los pesos retenidos parciales de cada tamiz.
6. Calcular la granulometría (ver anexo 1) y elaborar la curva granulométrica como se presenta en la grafica 3.1.

Con los datos obtenidos (% acumulado que pasa) se traza la curva granulométrica del material, en una gráfica donde la abertura de las mallas se sitúa en las abscisas en escala logarítmica y en las ordenadas los porcentajes de material que pasan por dichas mallas, a escala natural.



GRAFICA 3.1 Curva granulométrica correspondiente a Grava 3/4"

El procedimiento para realizar el ensayo granulométrico a la arena triturada, básicamente engloba todos los numerales anteriormente descritos pero exceptuando el quinto numeral, el tamizado se realiza con las siguientes mallas: N°4", N°8, N°10, N°20 N°40, N°60, N°100 y N°200. Los resultados se presentan en el cuadro de cálculo (ver anexo 2) y su respectiva curva granulométrica como se presenta a continuación en la grafica 3.2.



GRAFIA 3.2 Curva granulométrica para la arena triturada.

3.2.5 RESISTENCIA A LA DEGRADACION POR ABRACION E IMPACTO DE LOS AGREGADOS GRUESOS (ASTM C 131 / 89, AASHTO T 96 - 92).

Este ensayo se emplea para medir la resistencia de los áridos al desgaste o a la abrasión, se carga el tambor de la máquina de los Ángeles con una cantidad fija de áridos y de esferas de acero siendo registrados en el cuadro respectivo (Ver Anexo 3), luego se hacen dar 500 vueltas al tambor (ver figura 3.6) determinándose así el porcentaje del material que se define como porcentaje de desgaste.



FIG. 3. 6 Tambor de la Máquina los Ángeles.

Los resultados obtenidos de la prueba hecha en laboratorio al material pétreo grava 3/4" se presentan en el cuadro respectivo. (Ver cuadro resumen en, anexo 3).

3.2.6 ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS ANTE LA ACCION DEL SULFATO DE SODIO O SULFATO DE MAGNESIO (AASHTO T 104 – 92, ASTM C 88 – 83).

Este método comprende el ensayo de agregado para la determinación de la sanidad, cuando estos estarán sometidos a la acción del intemperismo como en una carpeta de rodadura. Este mide la resistencia de los áridos a la disgregación por soluciones saturadas de sulfato de sodio o magnesio. El proceso de inmersión y secado se realiza por varios ciclos determinándose así el porcentaje de pérdidas de peso por cada fracción granulométrica.

A. EQUIPO Y HERRAMIENTA.

- ❖ Mallas para agregado fino: N° 100, N° 50, N° 30, N° 16, N° 8 y N° 4.
- ❖ Mallas para agregado grueso: 3/4" 5/8", 1/2", 3/8" y 5/16".
- ❖ Balanzas.
- ❖ Horno eléctrico
- ❖ Espátula con hoja de 6"
- ❖ Charolas
- ❖ Guantes de hule
- ❖ Mascarilla

B. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

- a. Se prepara la solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4), 48 horas antes de su utilización y debe mantenerse a una temperatura de 22° C.
- b. Las muestras de ensayo deben: lavarse utilizando la malla N° 100, estar seca a peso constante y ser representativa.

- c. El agregado fino para el ensayo, deberá ser tamizado a través de la malla 3/8" debiendo tener un tamaño no menor a 100 gramos.
- d. Para el agregado grueso la muestra no deberá contener material mas fino que la malla N° 4, debiendo estar formada para este caso particular de los siguientes tamaños:

<i>Tamaño del agregado</i>	<i>peso (gr)</i>
3/8" a N° 4	300 ± 5
3/4" a 3/8"	1000 ± 10
1/2" a 3/8"	330 ± 5
3/4" a 1/2"	670 ± 10

- e. Luego de obtener la muestra de ensayo se introduce en la solución preparada de sulfato de sodio o de magnesio durante un periodo de tiempo de 16 horas y no mayor de 18 horas, debiendo permanecer el material cubierto totalmente por la solución en una profundidad no menor de 1/2". La temperatura de la inmersión deberá ser de 21° C.
- f. Después del período de inmersión, se remueve la muestra de la solución, permitiéndole que drene durante 15 ± 5 minutos, con el objeto de introducirla a secado dentro del horno a una temperatura de 110 ± 5 °C y chequeando los pesos cada 2 ó 4 horas hasta obtener un peso constante.
- g. Al final del período de secado, se enfría la muestra a temperatura ambiente, para luego introducirla en otra porción nueva de solución.
- h. El proceso descrito en los literales e, f y g se repiten hasta cumplir cinco ciclos completos de inmersión – secado.
- i. Una vez terminados los 5 ciclos de saturación – secado y con la muestra a temperatura ambiente, se procede a lavarla hasta dejarla libre de solución de sulfato de sodio.

- j. Cuando todo el sulfato de sodio ha sido removido, se seca la muestra dentro de un horno hasta peso constante a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}$ C.
- k. Luego se tamiza cada porción del agregado en sus respectivas mallas según el tamaño apropiado de las partículas. No se debe usar extra manipulación para romper las partículas u obligarlas a que pasen cualquiera de las mallas.
- l. Finalmente se pesa el material (arena triturada) retenido sobre cada malla y se registra cada cantidad en el cuadro correspondiente. Los resultados se detallan en el cuadro resumen en el anexo 4.

El valor obtenido de **1.3** debe considerarse únicamente como una estimación preliminar de la resistencia al intemperismo del agregado ensayado, ya que las condiciones reales de intemperismo a que estarán sujetos los agregados dentro de un proyecto carretero específico, serán las que definirán el verdadero comportamiento de los mismos.

3.2.7 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (AASHTO T 85 – 91, ASTM D- C 128 - 88)

La Gravedad específica es la relación entre el peso al aire en una unidad de volumen de un material y el peso del mismo volumen de agua a una temperatura especificada. Este valor es adimensional.

La absorción es el incremento en el peso del agregado, causado por el agua que se deposita en los poros accesibles del material, no incluyendo el agua adherida a la superficie exterior de las partículas.

Se determina la gravedad específica por dos razones: para permitir el cálculo de los vacíos de las mezclas asfálticas compactadas; y, para corregir las

cantidades de agregados empleados en una mezcla para pavimentación cuando su peso específico varía apreciablemente.

A. EQUIPO Y HERRAMIENTAS PARA REALIZAR ENSAYO.

- ❖ Balanza de 2610 gr de capacidad y 0.1 gr de aproximación.
- ❖ Canasta de densidades (construida de una malla N° 8, con capacidad para recibir agregado con un diámetro máximo de 1 ½")
- ❖ Tanque de saturación (donde se introducirá la canasta de densidades)
- ❖ Mallas N° 4 y N° 8.



FIG.3.7 Equipo y herramientas para realizar ensayo de Gravedad Especifica

B. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

- a) La muestra a utilizar en este ensayo deberá ser representativa, para lo cual se toma de un cuarteo con el objeto de reducir su tamaño al necesario. El material que pasa la malla N° 4 es eliminado a través de un tamizado seco de la muestra de ensayo.
- b) El material obtenido deberá lavarse con eficacia a través de la malla N° 8 con el fin de remover todo el polvo adherido a la superficie del agregado grueso. El peso mínimo de la muestra de ensayo a utilizar se presenta en el cuadro 3.7.

CUADRO 3.3 Peso mínimo de la muestra para ensayo Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso.

AGREGADO GRUESO	
Tamaño Nominal Máximo mm (in)	Peso mínimo de la Muestra de ensayo, Kg (Lb)
150.0 (6)	125(276)
125.0 (5)	75(165)
112.0 (4½)	50(110)
100 (4)	40 (88)
90.0 (3½)	25 (55)
75 (3)	18 (40)
63.0 (2½)	12 (26)
50.0 (2)	8 (12)
37.5 (1½)	5 (11)
25.0 (1)	4 (8.8)
19.0 (3/4)	3 (6.6)
12.5 (1/2) o menor	2 (4.4)

FUENTE: Trabajo de Grado “Propuesta de manual para la asignatura Laboratorio de Pavimentos en la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad d El Salvador”.

- c) Secar el material obtenido a una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C durante 24 horas. Luego dejar que se enfríe a una temperatura que sea confortable su manipulación.
- d) Después que se ha logrado el enfriamiento, se procede a sumergir el agregado en agua a temperatura ambiente por un periodo de 24 ± 4 horas.
- e) Remover la muestra de ensayo del agua y envolverla en un tela absorbente hasta eliminar toda el agua superficial en el agregado

NOTA: Las partículas grandes deben ser secadas individualmente.

- f) Lugo que se ha logrado la condición Saturada Superficialmente Seca (SSS) se pesa al aire la muestra y se registra su peso nombrándolo con la letra B (Todas las anotaciones respectivas al ensayo se realizan en el cuadro presentado en anexo 5).

- g) Inmediatamente después de pesar el material, se coloca la muestra dentro de la canasta de densidades, la cual ha sido destarada previamente en la balanza, luego se introducen en el agua (temperatura del agua 25° C) y se registra el peso del material sumergido nombrándolo con la letra C.
- h) Finalmente se seca la muestra en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}$ C durante 24 horas hasta obtener peso constante. Después se deja enfriar a temperatura ambiente para poderla pesar en esas condiciones el peso obtenido se registra nombrándolo con la letra A.

Las formulas utilizadas para realizar los cálculos y obtener los resultados correspondientes (como se puede observarse en el anexo 5) de las Gravedades Especifica y el porcentaje de absorción son las siguientes:

- ❖ Gravedad Específica: _____
- ❖ Gravedad Bulk (SSS): _____
- ❖ Absorción: _____

Donde:

A = Peso de La Muestra al Aire Secada en Horno.

B = Peso de la Muestra Saturada Superficialmente Seca

C = Peso de la Muestra Saturada en Agua

Estos valores pueden ser indicativos de la calidad de los materiales pétreos por ejemplo, absorciones altas indicaran agregados con alto contenido de poros permeables, lo que los vuelve de mala calidad para mezclas de superficie¹⁰.

¹⁰ Tomado de Trabajo de Grado "Propuesta de manual para la asignatura Laboratorio de Pavimentos en la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad d El Salvador".

Los agregados con gravedad específica menores a 2.000 no son apropiados para mezclas de superficie, ya que pueden catalogarse como agregados livianos propensos a excesiva pulimentación, a causa de las cargas verticales.

3.2.8 GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO (AASHTO T 85 – 91, ASTM D- C 128 - 88)

A. EQUIPO Y HERRAMIENTAS PARA REALIZAR ENSAYO.

- ❖ Balanza de 2610 gr. de capacidad y 0.1 gr. de aproximación.
- ❖ Horno con circulación de aire y temperatura regulable para las condiciones del ensayo.
- ❖ Recipientes con capacidad suficiente para contener la muestra del ensayo.
- ❖ Matraz aforado en el que se puede introducir fácilmente la muestra de ensayo.
- ❖ molde con forma de tronco-cónica de 40 ± 3 mm. de diámetro en la parte superior 90 ± 3 mm. de diámetro en la parte inferior y 75 mm de altura.
- ❖ Pisón con extremo de sección plana y circular de 25 ± 3 mm. de diámetro, debe tener una masa de 340 ± 15 gr.

B. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

- a) La muestra a utilizar en este ensayo deberá ser representativa, para lo cual se toma de un cuarteo con el objeto de reducir su tamaño al necesario.
- b) El material que pasa la malla N° 4 es eliminado a través de un tamizado seco de la muestra de ensayo.
- c) El material obtenido deberá lavarse con eficacia a través de la malla N° 8 con el fin de remover todo el polvo adherido a la superficie del agregado.
- d) Se seca la muestra del agregado en un horno hasta peso constante.

e) Se sumerge en agua o se incrementa al menos 6% de humedad al agregado fino y se deja reposar por aproximadamente 24 ± 4 horas para esencialmente llenar los poros.

f) Se decanta el agua con cuidado para evitar pérdida de finos, se extiende la muestra en una superficie plana no absorbente exponiéndola a movimientos suaves de corriente de aire, y mezclando frecuentemente para asegurar un secado homogéneo. Se puede emplear ayuda mecánica tal como espátula o agitador para lograr la condición saturada y superficialmente seca. Se continúa con esta operación hasta que el espécimen de prueba se aproxime a la condición de flujo libre.

g) Para determinar si la humedad superficial continúa presente en las partículas que constituyen el agregado fino se sigue el procedimiento siguiente.

h) Se sostiene el molde firmemente sobre una superficie suave y lisa con el diámetro grande hacia abajo.

i) Se vacía cuidadosamente la porción del agregado fino secado parcialmente llenando hasta el borde y amontonando material adicional sobre la parte superior del molde, sosteniendo el molde con los dedos de la mano ahuecados. Se apisona ligeramente el agregado fino dentro del molde con 25 golpes del pisón. Se deja caer el pisón desde una altura de 5 mm arriba de la superficie del agregado fino.

Permitiendo que el pisón caiga libremente bajo la atracción gravitacional en cada uno de los golpes. Se ajusta la altura al inicio para una nueva elevación de la superficie después de cada golpe y se distribuyen los golpes sobre la superficie.

j) Se retira la arena suelta de la base y se levanta el molde verticalmente. Si la humedad superficial continúa presente, el agregado fino tendrá la forma del molde.

Cuando haya una caída insignificante o escasa de agregado fino del molde se ha alcanzado la condición de secado superficial. Se hace el primer intento de prueba de humedad superficial cuando hay algo de agua en el espécimen de prueba. Se continúa secando con mezclado constante y probando a intervalos constantes hasta que el ensaye indique que el espécimen ha alcanzado la condición de secado superficial. Si el primer intento de la prueba de humedad superficial indica que no hay humedad presente en la superficie de las partículas, el material está más seco que la condición de saturado y superficialmente seco. En este caso, se mezclan completamente unos pocos mililitros de agua con el agregado fino y se deja reposar el espécimen en un contenedor cubierto durante 30 minutos. Luego se reanuda el proceso de secado y ensaye a intervalos frecuentes para el inicio de la condición de secado superficial.

k) Se llena parcialmente el picnómetro (calibrado) con agua. Se introduce dentro del picnómetro 500 ± 10 g de agregado fino saturado y superficialmente seco y se llena con agua adicional hasta aproximadamente 90% de la capacidad.

l) Se tapa manualmente, se invierte y agita el picnómetro para eliminar todas las burbujas de aire. Se requieren normalmente cerca de 15 a 20 minutos para eliminar las burbujas de aire por métodos manuales. Se ha visto que es útil mojar la punta de una toalla de papel dentro del picnómetro para dispersar la espuma que algunas veces se concentra cuando son eliminadas las burbujas de aire. Opcionalmente una pequeña cantidad de alcohol isopropílico puede ser usado para dispersar la espuma.

m) Después de eliminar todas las burbujas de aire, se ajusta la temperatura del picnómetro y su contenido a $23.0 \pm 2^\circ\text{C}$ si es necesario por inmersión parcial en agua circulando, y se llena con agua el picnómetro hasta la marca de calibración.

Se determina la masa total de la muestra, el picnómetro y el agua.

n) Se retira el agregado fino del picnómetro, se seca a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, se enfría a temperatura ambiente durante $1 \pm \frac{1}{2}$ horas y se determina la masa seca.

o) Se determina la masa del picnómetro lleno hasta la marca de calibración con agua a una temperatura de $23 \pm 2.0^\circ\text{C}$.

Las formulas utilizadas para realizar los respectivos cálculos y obtener los resultados correspondientes de las Gravedades Especifica y el porcentaje de absorción son las siguientes:

Gravedad específica neta del agregado G_{sb}

Donde:

A = masa de la muestra ensayada secada al horno, g

B = masa del picnómetro lleno con agua, g

C = masa del picnómetro, agregado saturado y superficialmente seco y agua, g

S = masa del agregado saturado y superficialmente seco.

Gravedad específica en condición saturada y superficialmente seca G_{sss}

Donde:

B = masa del picnómetro lleno con agua, g

C = masa del picnómetro, agregado saturado y superficialmente seco y agua, g

S = masa del agregado saturado y superficialmente seco.

Gravedad específica aparente (Gsa)

Donde:

A = masa de la muestra ensayada secada al horno, (gr).

B = masa del picnómetro lleno con agua, (gr).

C = masa del picnómetro, agregado saturado y superficialmente seco y agua, (gr).

Absorción:

Donde:

A = masa de la muestra ensayada secada al horno, (gr).

S = masa del agregado saturado y superficialmente seco.

C) DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA

Los valores obtenidos fueron los siguientes:

Gravedad específica neta del agregado Gsb = **2551**.

Absorción: **1524**.

Gravedad específica en condición saturada y superficialmente seca:

Gsss= **2590**.

Gravedad específica aparente Gsa: **2655**

3.2.9 EQUIVALENTE DE ARENA (ASTM D 2419).

Es la medida de la cantidad de limos o arcillas contaminantes presentes en agregados finos o arenas, y es expresado como un valor porcentual.

El propósito de este ensayo es servir como una prueba rápida de campo, que permita evaluar las características de los agregados a utilizar. Este indica la proporción relativa de polvo fino o materiales arcillosos perjudiciales contenidos en el agregado empleado en la mezcla asfáltica para pavimentación. Este ensayo se aplica a la fracción que pasa por la malla N° 4 (4.75 mm).

A. EQUIPO Y MATERIALES.

- ❖ Cilindro graduado de plástico transparente, con capacidad para 1000 ml con tapón.
- ❖ Medida para la muestra: Pequeño recipiente cilíndrico de hojalata de 85 ± 5 ml de capacidad.
- ❖ Dos recipientes de un galón (3.78lt) de capacidad, para almacenar las soluciones de Cloruro de Calcio (CaCl_2).
- ❖ Agitador mecánico con montura firme para agitar la probeta y su contenido en posición horizontal (si no se cuenta con él se realiza manualmente).
- ❖ Reactivos (Solución de Cloruro de Calcio Anhídrido, 454 gr (1 libra)
- ❖ Misceláneo: Malla N° 4, embudo de boca ancha, bandeja ancha para mezclado y un cronometro.

B. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

1. Obtener por lo menos 1500 gr de material que pasa la malla N° 4.
2. Preparar el espécimen de ensayo a partir de la porción de la muestra que ha pasado la malla N° 4.

3. Cuartear el material lo suficiente para llenar hasta su borde superior, cuatro medidas de hojalata. Cada vez que se tome la medida, esta debe enrasarse sobre su borde superior, luego golpear suavemente el fondo de la medida sobre la mesa de trabajo por lo menos cuatro veces, para producir una medida de material consolidada.
4. Determinar y registrar la cantidad de material contenido en cada una de estas cuatro medidas. Esto se puede realizar por peso o por volumen en una probeta graduada.
5. Reintegrar este material a la muestra y proceder a cuartear o separar el material realizando los ajustes necesarios para obtener la cantidad predeterminada de este material (el peso o volumen de cuatro medidas de material cuarteado).
6. Secar cada espécimen de ensayo a temperatura constante de $105 \pm 5^{\circ} \text{C}$ durante 18 a 24 horas, luego se deja enfriar a temperatura ambiente para poder iniciar.
7. Separar de 1000 a 1500 gr del material. Mezclarlos vigorosamente con una cuchara de mano (llana) dentro de una bandeja circular mantenida en posición horizontal. Este mezclado deberá mantenerse por lo menos durante 1 minuto para completarlo uniformemente y deberá estarse chequeando la humedad del material, para lo cual se elabora manualmente un rollo de material, se dice que el rango correcto de humedad se logra cuando dicho rollo se logra formar sin quebrarse.
8. Tomar la medida de hojalata con una mano y presionarla directamente contra el material almacenándolo, esta deberá llenarse con material consolidado, para lo cual será necesario hacer presión sobre el material y enrazándolo con una espátula haciendo presión cuando este se halla llenado completamente.

9. Con el sifón se introduce a la probeta 4 ± 0.1 pulgadas de solución de calcio.
10. Colocar uno de los especímenes de ensayo dentro de la probeta plástica graduada usando un embudo para evitar derramamientos de solución al momento de introducir el material.
11. Conectar la probeta al agitador si la prueba se hará utilizando agitador mecánico y permitir que el espécimen colocado anteriormente se humedezca lo mejor posible.
12. Permitir que el material se humedezca bien, durante un tiempo de 10 ± 1 minuto dentro de la probeta.
13. Al final de este periodo de remojo, se taponea la probeta para remover el material del fondo, usando un agitador mecánico o realizando un agitado manual. En este procedimiento se hizo uso del agitado manual.
14. Después que el material se ha removido del fondo de la probeta, esta se sacude vigorosamente en forma horizontal de tal forma que el contenido se mueva de extremo a extremo. Esta acción de sacudido debe realizarse en 90 ciclos durante un tiempo aproximado de 30 segundos. Un ciclo es definido como un movimiento completo de vaivén.
15. Logrado el agitado, se coloca la probeta sobre la mesa de trabajo y se remueve el tapón.
16. Una vez colocada sobre la mesa, se procede a irrigar el cilindro sobre sus paredes, introduciendo la manguera que esta conectada al garrafón con la solución de cloruro de calcio para que la solución que cae sobre sus paredes arrastre hasta el fondo todos los residuos adheridos a las mismas. La irrigación debe suspenderse hasta que el nivel de la solución alcance las 15 pulgadas indicadas sobre la probeta.

17. Dejar que la probeta y su contenido reposen sobre la mesa de trabajo, durante un tiempo de 20 minutos \pm 5 segundos. El cronómetro debe activarse inmediatamente se termina la acción de irrigado.
18. Cuando ha transcurrido este tiempo de sedimentación, se lee y se registra en el cuadro correspondiente (Ver anexo 6) el nivel de las arcillas suspendidas en la forma que se indica en el paso 21. Esta es referida como la lectura de arcillas. Si después de los 20 minutos de sedimentación la lectura de arcillas no puede ser hecha por sedimentación de la línea de su superficie, debe permitirse más tiempo de sedimentación (no mayor de 30 minutos).
19. Después de haber hecho la lectura de arcillas, introducir en la probeta el conjunto del contrapeso y la varilla de manera que su guía corredera queda en la boca de la probeta. Bajar suavemente el conjunto hasta que llegue a reposar sobre la arena. Al tiempo de bajarse el conjunto, debe mantenerse siempre uno de los tornillos de centrado del disco en contacto con la pared de la probeta sobre las marcas de la misma, de tal manera que sirva como índice de lectura. Cuando el conjunto acabe de pasarse sobre la arena, se lee el nivel del tornillo de centrado y se registra esta lectura como lectura de arena, esta lectura se hará con aproximación de 0.1 pulgadas.
20. Cuando se está registrando la lectura se debe tener cuidado de no presionar la guía hacia abajo para no obtener lecturas erróneas.
21. Si las lecturas de arcilla o arena caen entre graduaciones de 0.1 pulgadas, se deberá registrar el nivel superior inmediato correspondiente. Por ejemplo, un nivel de arcilla de 7.95 se registra como 8.0. Un nivel de arena de 3.22 se registra como 3.3.

Para el cálculo del valor de Equivalente de Arena con aproximación de decimas se aplica la siguiente ecuación: $E.A = \text{-----}$

El resultado obtenido de dicha prueba se presenta en el cuadro resumen en el apartado de anexos (ver anexo 6).

El valor de equivalente de arena de **87.4 %**, será un parámetro más para la evaluación de la calidad de los materiales. Generalmente las especificaciones de materiales, indican los valores máximos permisibles para la aceptación de un material las cuales varían dependiendo del propósito del material ensayado.

3.3 ANALISIS GRANULOMETRICO COMBINADO.

Los agregados pétreos deben cumplir con la propiedad de la gradación para ser considerado apropiado en el diseño de una mezcla asfáltica. Se requiere que las partículas estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño esté presente en ciertas proporciones.

3.3.1 CALCULO DE LA GRADACION COMBINADA TEORICA DE AGREGADOS PETREOS (AASHTO T 27 – 93, AASHTO T 11 y ASTM D 136).

El análisis de la gradación de agregados y su combinación para obtener la granulometría deseada, son pasos importantes en el diseño de mezclas asfálticas. La granulometría de los agregados debe encontrarse dentro de las especificaciones del proyecto y además debe lograr que la mezcla producida con éstos, cumpla con los parámetros del método de diseño utilizado.

La determinación de las proporciones a mezclar, de dos o más agregados que se utilizan en la producción de una mezcla, es un trabajo largo de prueba y error, no obstante existen métodos para disminuir el tiempo de determinación.

Los métodos de proporcionamiento de agregados son los siguientes:

- a.Método de Pesos Volumétricos
- b.Método de la Formula Básica o Tanteos sucesivos
- c.Método Gráfico

El método que se ocupará en esta investigación es el de “La Formula Básica o Tanteos Sucesivos”. Para efectuar el cálculo de la gradación teórica

combinada fue necesaria la experiencia de los técnicos de laboratorio, ya que este se ejecutó mediante la ayuda de un programa de computación (Microsoft Excel) el cual tiene su base en el método antes mencionado. Se realiza con la técnica de prueba y error, tomando en cuenta el tipo de mezcla a diseñar (densa) y la granulometría de cada agregado a combinar en este caso grava 3/4" y arena triturada.

El procedimiento de determinación de la combinación óptima de dos agregados, conlleva los siguientes pasos:

1. Examinar las dos granulometrías (arena = agregado A y grava 3/4" = agregado B) para determinar cuál de los dos agregados aporta mayor cantidad de ciertos tamaños.
2. Se afectan las granulometrías de los agregados por sus correspondientes proporciones " a " y " b " (por ejemplo a = 60% y b = 40%).
3. Se analiza la granulometría obtenida de acuerdo a la especificación granulométrica establecida, este diseño se basará en las bandas de especificación del SIECA TABLA 703-9 columna C, que se presenta en el cuadro 3.4. Si se observa que los " Porcentajes Pasantes" se aproxima a los límites de la especificación, se procede al siguiente tanteo, aumentando (cuando se requiere de mayor pasante) o disminuyendo (cuando se requiere de menor pasante) el valor de la proporción del agregado que tiene mayor contribución en el tamaño que muestra mayor cercanía al límite de la especificación.
4. Con los nuevos valores de " a " y " b " (por ejemplo "55%" y "45%"), se procede a afectar nuevamente la granulometría original de los agregados " A " y " B " y procede de nuevo al mismo análisis. Los tanteos terminan

cuando se observa que la granulometría tiene tendencia a posicionarse lo más cerca posible al centro de la especificación (uso granulométrico).

Los tanteos realizados durante la combinación teórica para la investigación fueron tres, el primero se hizo dando una proporción de 60% para la arena triturada y un 40% para la grava 3/4". Luego con la ayuda del programa se verificó el gráfico y utilizando la banda de especificación (ver cuadro 3.10 columna C) se observó que la granulometría se aproximaba a los límites de la especificación.

NOTA: Se decidió usar las bandas de la columna C por que es la que mas se ajusta al tipo de agregado combinado.

CUADRO 3.4 Rangos Requeridos Granulometría Densa para Pavimentos con Emulsión Asfáltica

MALLA	PORCENTAJE POR PESO PASANDO LA MALLA ESTÁNDAR (AASHTO T 27 AAHSTO T 11)				
	DESIGNACION DE LA GRANULOMETRIA				
	A	B	C	D	E
50 mm	100				
37.5 mm	95-100	100			
1" (25 mm)	-	95-100	100		
3/4" (19 mm)	60-80 (7)	-	95-100	100	
1/2" (12.5 mm)	-	60-80 (7)	-	95-100	100
3/8" (9.5 mm)	-	-	60-80 (7)	-	95-100
# 4 (4.75 mm)	20-55 (7)	25-60 (7)	35-65 (7)	45-70 (7)	60-80 (7)
# 8 (2.36 mm)	10-40 (6)	15-45 (6)	20-50 (6)	25-55 (6)	35-65 (6)
# 100 (300 mm)	2-16 (4)	3-18 (4)	3-20 (4)	5-20 (4)	6-25 (4)
# 200 (75 µm)	0-5 (3)	1-7 (3)	2-8 (3)	2-9 (3)	2-10 (3)

() Desviación permisible (±)

FUENTE: Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales. (SIECA).

Segundo tanteo, para este se utilizó una proporción de 55% para arenas y 45% para grava 3/4", se verificó su granulometría y se observó que esta tuvo una tendencia cercana al centro de la banda.

Finalmente se efectuó el tercer tanteo, brindándole un 52% a las arenas y un 48% a la grava 3/4".se chequeó su granulometría y se tuvo una tendencia más próxima al centro de la especificación. Quedando el proporcionamiento de los materiales de la siguiente manera:

- a) ARENA TRITURADA = 52%
- b) GRAVA 3/4" = 48%

3.3.2 ANALISIS DE COMPROBACION POR CEDASOS, DE AGREGADOS FINOS Y GRUESOS (ASTM D 136).

Efectuada la combinación teórica de agregados se procede a realizar el ensayo granulométrico de comprobación (Real), que se describe a continuación: Teniendo las muestras de agregados se mezclan en una proporción de 52% de agregado de la muestras (arena triturada) y 48 % de agregado de muestra (Agregado B).

Como siempre es necesario el cuarteo de material (Ver figura 3.8), teniendo cuidado de que la mezcla se encuentre homogénea y que interactúen todos los agregados satisfactoriamente.



FIG. 3.8 Cuarteo de material pétreo combinado.

Después de cuartear cada uno de los materiales se toman las muestras correspondientes, la especificación establece tomar un valor mínimo de 5000 gr de material combinado, para esta investigación se utilizarán 5400 gr de material pétreo combinado, ya que durante la ejecución de la prueba de laboratorio se pierden ciertas cantidades de agregado como también por su humedad natural.

A continuación se presentan los cálculos respectivos de para este ensayo.

Según resultados del análisis teórico se tiene:

- 48% de material grueso (grava 3/4")
- 52% de material fino (arena triturada).

Luego los 5400 gr de muestra de ensayo se someten al respectivo secado en horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ} \text{C}$, por un período de 24 horas. Transcurrido este tiempo se pesa el material en balanza y se anota en el cuadro correspondiente como Peso Seco sin Lavar observar cuadro 3.11 en Anexo 7.

Peso Seco sin Lavar = 5301 gr.

Lavar el peso obtenido de material a través de la malla N° 200, con el fin de eliminar eficientemente los finos del material procurando no perder partículas de suelo, este estará bien lavado hasta que el agua que pasa a través de la malla se mantenga transparente. Una vez el material este bien lavado se coloca dentro de un horno en un periodo de 18 a 24 horas a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ} \text{C}$.

Seguidamente se pesa de nuevo el material y se anota en el cuadro correspondiente (Ver Anexo 7) como Peso seco lavado. Para obtener el peso de los finos por lavado se efectúa la diferencia de (Peso Seco sin Lavar) – (Peso seco lavado), este valor se anota como peso de material fino por lavado.

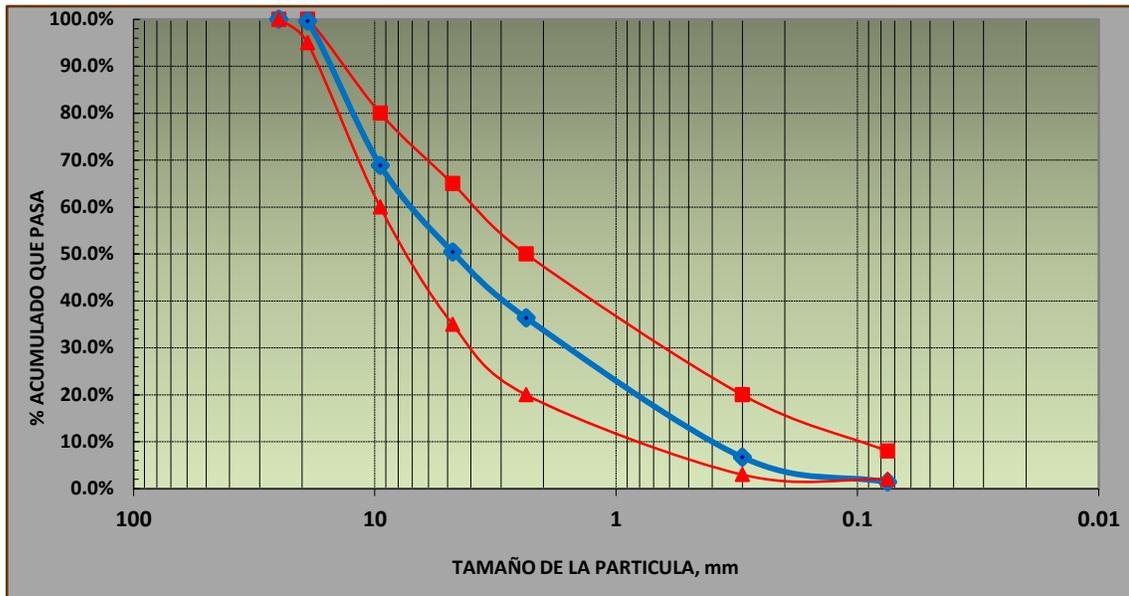
Peso seco de la muestra después de lavado = 5246 gr

Peso de material fino por lavado = 5301 gr - 5246 gr

Peso de material fino por lavado = 55 gr

Luego se procede al tamizado del Peso seco de la muestra después de lavado, este puede realizarse con vibrador mecánico (suelen utilizarse 15 minutos de vibrado) o manualmente (30 minutos), usando las mallas que establece la banda de especificación del SIECA cuadro 703-9 columna C (ver cuadro anterior 3.4).

Los resultados se presentan en los cuadros correspondientes (Ver Anexos 7 y 8), al análisis granulométrico de la combinación teórica y real de los agregados con la curva granulométrica correspondiente (Ver grafica 3.3), utilizando la especificación del SIECA que se establece a las granulometrías densas para pavimentos con emulsión asfáltica.



GRAFICA 3.3 Representación logarítmica del material pétreo combinado.

3.4 CALCULO DEL PORCENTAJE DE EMULSION. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

Del cuadro del Anexo 7 granulometría combinada se toman los datos necesarios y establecidos por la formula de Illinois:

$$E = 0.05 A + 0.1 B + 0.5 C$$

Donde:

E = porcentaje en peso de la emulsión asfáltica.

A = 100 – pasante de la malla N° 8. En porcentaje.

B = (Material pasante de MALLA N° 8) – (Material pasante de la malla N° 200).

C = Material pasante de la malla N° 200

Luego con los datos determinados la formula quedó de la siguiente forma:

Por tanto el porcentaje de emulsión a utilizar en el diseño es:

$$E = 8.019 \% \approx 8.02 \%$$

3.4.1 CALCULO DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN MATERIAL COMBINADO PARA ENSAYO DE RECUBRIMIENTO.

Este cálculo se hace necesario para conocer la humedad con la que se encuentra el material ya combinado (Grava 3/4" y Arena triturada) y establecer la cantidad en peso de dicha humedad.

El cálculo es el siguiente:

$$\text{Tara} = 73 \text{ gr}$$

Luego:

$$\text{Material (grava 3/4")} = 500 \text{ gr} \cdot 0.48 = 240 \text{ gr}$$

$$\text{Material (arena)} = 500 \text{ gr} \cdot 0.52 = 260 \text{ gr}$$

$$W_h = 240 \text{ gr} + 260 \text{ gr} = 500 \text{ gr}$$

Entonces:

$$W_{\text{muestra}} = W_h + \text{tara} = 500 \text{ gr} + 73 \text{ gr} = 573 \text{ gr}$$

Esta muestra se mete al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ y se chequea el peso cada hora hasta que el peso sea constante, este proceso puede durar entre 18 y 24 horas.

- Peso inicial de la muestra = 573 gr
- Peso después de 1 hora = 570 gr
- Peso después de 2 horas = 568 gr
- Peso después de 3 horas = 566 gr
- Peso después de 4 horas = 566 gr, como el peso de la muestra no cambia es constante, este es el peso final.
- Peso final = 566 gr

Por tanto:

$$W_s = \text{material} - \text{tara} = 566 \text{ gr} - 73 \text{ gr} = 493 \text{ gr}$$

$$W\% = \text{—————}$$

$$W\% = \text{—————} = 1.42\%$$

W%= 1.42% (porcentaje de humedad del material combinado)

Ocupando el porcentaje de emulsión calculado anteriormente en el apartado 3.4 se tiene:

Emulsión= 8.02%

W%= 1.42%

Con esta información se procede a realizar el ensayo de cobertura recordando que este tipo de emulsión (CSS – 1H AC-30) aporta un 40% de humedad a la mezcla, esto quiere decir que de acuerdo al contenido de humedad del material pétreo (arena triturada y grava 3/4") se debe de hacer un ajuste de tal manera que el agua que ya tiene el agregado sea restada a lo que la emulsión aporta.

3.5 ENSAYO DE COBERTURA (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

3.5.1 CONTENIDO ÓPTIMO DE RECUBRIMIENTO DE LA MEZCLA.

En la práctica de diseño es recomendable observar la facilidad de la emulsión para cubrir el agregado (ver figura 3.9) el cual normalmente es afectado por el contenido de agua de premezcla. Esto da lugar a ejecutar el ensayo de recubrimiento con diferentes contenidos de humedad.



FIG.3.9 Muestra de ensayo de recubrimiento con 8% de humedad

Utilizando humedades de $w\%=8\%$, $w\%=7\%$, $w\%=6\%$ y $w\%=5\%$. Se harán ensayos para cuatro puntos de humedad del agregado pétreo (arena triturada y grava $\frac{3}{4}$ "), partiendo del 7% que de acuerdo a la experiencia de los laboratoristas del plantel de ASFALCA es la óptima en otros diseños. Luego se procede al cálculo respectivo:

Peso de Emulsión = _____

% de Agua a agregar= (humedad de diseño) – (humedad de la mezcla)

% de Agua a agregar= (7%) – (4.62%)= 2.38%

Agua a agregar= _____

Agua a agregar= _____ = 11.9 gr

Para calcular la cantidad en gramos del agregado pétreo se hace de la siguiente manera:

Como se necesitan 500 gramos secos y como tiene una humedad de $w\%=1.42\%$ se realiza el siguiente cálculo:

Agregado Pétreo= (500gr *1.42%)= 507.2 gr

- Arena triturada = $507.2 * 52\% = 263.75$ gr
- Grava $\frac{3}{4}$ " = $507.2 * 48\% = 243.46$ gr

RESUMIENDO:

Para realizar la prueba de recubrimiento con una humedad de $w\%=7\%$ se necesita lo siguiente:

1. Emulsión= 40.095 gramos
2. Agua a agregar = 11.9 gramos
3. Agregado pétreo:

3.1 Arena triturada= 263.75 gramos

3.2 Grava ¾"= 243.46 gramos

PROCEDIMIENTO:

1. Mezclar la arena triturada y la grava ¾".
2. Agregar los 11.9 grs. de agua y se mezcla de tal manera que el agregado pétreo tenga un color uniforme.
3. Agregar los 40.095 grs. de emulsión (CSS – 1H AC-30).
4. Mezclar durante 30 segundos a 1 minuto si se hace utilizando mezclador mecánico, pero en este caso se hizo de manera manual y el tiempo de mezclado es de 1 a 3 minutos (método de Illinois).
5. Colocar la mezcla en una charola o plato desechable.
6. Visualmente se chequea cada media hora la mezcla y observando el pase de color marrón a negro, cuando haya sucedido esto significa que se ha dado el rompimiento de la emulsión, entonces se ve mejor recubrimiento.

De la misma forma se realizan los cálculos para los siguientes contenidos de humedad (8%, 7%, 6%, 5%, 4%), los resultados se presentan en el cuadro 3.5

CUADRO 3.5 Prueba de Recubrimiento de la Mezcla.

CONTENIDOS DE HUMEDAD (%)	% DE AGUA	AGUA A AGREGAR (gr)	½ HORA	1.0 HORA	1 ½ HORA	2.0 HORAS
7.0%	2.38%	11.9 gr	60%	100%		
8.0%	3.38%	16.9 gr		100%		
6.0%	1.38%	6.90 gr	50%			
5.0%	0.38%	1.90 gr		40%		65%
4.0%	NO	----	----	----	----	----

FUNTE: Presentación propia de los autores.

Para el contenido de humedad del 4% no es posible, ya que con el agua que contiene la emulsión y la humedad del agregado se pasa del 4% pues es de 4.62%.

3.6 FABRICACIÓN DE BRIQUETAS DE PRUEBA. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

3.6.1 CUARTEO DE MATERIAL PARA LA FABRICACION DE BRIQUETAS DE PRUEBA.

Antes de fabricar las briquetas de pruebas se procede a realizar un cuarteo de material.

Para fabricar 1 briqueta se necesita aproximadamente 1100 gramos.

Por tanto:

Arena triturada= $1100\text{gr} * 0.52 = 572 \text{ gr}$

Grava $\frac{3}{4}$ "= $1100\text{gr} * 0.48 = 528 \text{ gr}$

Entonces para realizar 12 briquetas se tiene la siguiente cantidad de material:

- Arena= $572\text{gr} * 12 \text{ briquetas} = 6864 \text{ gr.}$
- Grava $\frac{3}{4}$ "= $528\text{gr} * 12 \text{ briquetas} = 6336 \text{ gr.}$

NOTA: Cada cantidad de estos materiales se embolsa y se almacena para futuros ensayos de briquetas (12 briquetas por bolsa).

3.6.2 CONTENIDO OPTIMO DE COMPACTACION PARA LAS BRIQUETAS DE PRUEBA.

Se harán 3 briquetas de prueba para cada contenido de humedad ($w\% = 8\%$, $w\% = 7\%$, $w\% = 6\%$, $w\% = 5\%$, $w\% = 4\%$), para poder fabricar una briqueta la metodología Marshall exige dimensiones de 102mm (4") de altura y diámetro de 63.5mm (2.5"), para lograr estas dimensiones se hacen ajustes volumétricos variando las cantidades del agregado pétreo (grava $\frac{3}{4}$ " y arena triturada).

BRIQUETA DE PRUEBA # 1 CON $w\% = 7\%$ Y 1100 GR DE AGREGADO PÉTREO COMBINADO EN ESTADO SECO.

Como se sabe que la humedad es $w\% = 1.42\%$, entonces:

Peso de la muestra $W_{\text{muestra}}=1100 \text{ gr} \cdot (1+0.0142)= 1115.5 \text{ gr}$

Cuarteo del material:

- Arena triturada= $1115.5 \text{ gr} \cdot 52\% = 580.24 \text{ gr}$
- Grava $\frac{3}{4}$ "= $1115.5 \text{ gr} \cdot 48\% = 535.6 \text{ gr}$

Peso de la emulsión (W_E):

$E= 8.019\%$

$W_E: \text{—————} = 88.11 \text{ gr}$

% de Agua a agregar= (humedad de diseño) – (humedad de la mezcla)

% de Agua a agregar= (7%) – (4.62%)= 2.38%

Agua a agregar= _____

Agua a agregar= _____= 26.18 gr

Resumiendo:

Para el punto #1 (BRIQUETA 1) $W_{\text{optimo}}= 7\%$ se necesita:

- Emulsión= 88.11 gramos
- $W_{\text{agregado seco}}= 1100 \text{ gramos}$
 - Arena triturada= 572 gramos
 - Grava $\frac{3}{4}$ "=528 gramos
- Agua agregar= 26.18 gramos

PESO DE LA HUMEDAD A PERDER ANTES DE COMPACTAR

$W_{\text{agua a perder}}= \text{—————}$

Donde:

W_s = es el peso del agregado seco en gr.

W_t = es el porcentaje de humedad total de optima mezclado.

W_c = es el porcentaje de humedad al momento de compactar.

$W_{\text{agua a perder}}= 1100 \text{ —————} = 11 \text{ gramos}$

Humedad a perder antes de compactar= 11.00 gr

W%compactación= 6%.

Nota: los datos del cuadro 3.17 han sido calculados con los procedimientos antes descritos, aclarando que dicha información resumida es para la elaboración de briquetas “variando el contenido de asfalto residual”.

3.6.3 PROCEDIMIENTO PARA FABRICACION DE BRIQUETAS DE PRUEBA

A. MATERIAL Y EQUIPO.

- Arena triturada y grava $\frac{3}{4}$ " (1000 gr).
- Emulsion CSS – 1H AC-30
- Papel parafinado
- Balanza de precisión de 0.1 gr.
- Equipo misceláneo. (Brochas para limpieza, cepillo, espátulas de 4", charolas de lámina galvanizada, palas manuales, cucharas y cuchilla)
- Báscula digital con precisión de 1 gramo
- Pipeta plástica
- Moldes para briquetas
- Martillo mecánico manual Marshall
- Gato hidráulico

B. PROCEDIMIENTO.

- Colocar la arena y la grava en una charola y mezclar uniformemente.
- Colocar la charola con la mezcla en la báscula digital y agregar el agua calculada en gramos.
- Mezclar hasta que la mezcla tenga un color uniforme.
- Agregar la emulsión asfáltica calculada en gramos.
- Mezclar durante 90 segundos (metodología Marshall).
- Pesar la mezcla y esperar a que pierda el 1% de humedad a temperatura ambiente (metodología Marshall).
- Colocar la mezcla en el molde para briquetas.

- Varillar la mezcla en el molde, dándole 15 punzadas en el perímetro y 10 en el centro.
- Colocar el molde con la mezcla en el martillo Marshall, para luego proceder a la compactación, procurando darle de forma constante 50 golpes por cada lado. Inmediatamente se procede al curado de la briqueta dentro del molde en un período de 24 horas. Pasado este periodo desmoldar la briqueta con ayuda del gato hidráulico.

En el siguiente cuadro se muestran los resultados de los contenidos óptimos de humedad del 7%, 6% y 5%, para poder fabricar las briquetas de prueba:

CUADRO 3.6 Cuadro resumen para la elaboración de briquetas de prueba.

# de briqueta	contenidos óptimos de humedad %	peso de la muestra en estado húmedo (gramos)	peso de la muestra en estado seco (gramos)	Emulsión 8.019%, (gramos)	agua a agregar (gramos)	peso de la humedad a perder antes de compactar (gramos)	W% de compactación
1	7%	1115.5	1100	88.2	26.18	11.00	6%
2	7%	1064.91	1050	84.2	24.99	10.50	6%
3	7%	1014.91	1000	80.19	23.80	10.00	6%
4	6%	1014.91	1000	80.19	13.80	10.00	5%
5	6%	1014.91	1000	80.19	13.80	10.00	5%
6	6%	1014.91	1000	80.19	13.80	10.00	5%
7	5%	1014.91	1000	80.19	3.80	10.00	4%
8	5%	1014.91	1000	80.19	3.80	10.00	4%
9	5%	1014.91	1000	80.19	3.80	10.00	4%

FUNTE: Presentación propia de los autores.

NOTA: Las briquetas obtenidas con 1100gr y 1050 gr de material pétreo no cumplen con las dimensiones Marshall exigidas (diámetro=102mm y altura: 63.5mm), las briquetas con contenidos de material pétreo de 1000 gr. Si están dentro de las dimensiones establecidas, por tanto se tomara esta cantidad de pétreo para las briquetas de “variación del contenido de asfalto residual”, apartado 3.8.1.

3.7 GRAVEDAD BULK PARA BRIQUETAS DE PRUEBA. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

Simbología:

Wba: Peso de la briqueta al aire.

Wbw: Peso de la briqueta sumergida en agua.

Wsss: Peso de la briqueta saturada superficialmente seca.

La siguiente formula es la utilizada para calcular la gravedad bulk:

$$Gmb = \frac{Wba}{Wbw} \times \frac{Wsss - Wbw}{Wba - Wbw}$$

PARA BRIQUETA # 1:

Wba= 1062.00 gr

Wbw= 620.72gr

Wsss= 1076.00 gr

$$Gmb = \frac{1062.00}{620.72} \times \frac{1076.00 - 620.72}{1062.00 - 620.72} = 2.34$$

En el cuadro que a continuación se presenta se detallan los resultados de la Gmb para cada briqueta.

CUADRO 3.7 Densidades Bulk para cada Briqueta de Prueba.

# Briqueta	Wba (gr)	Wbw (gr)	Wsss (gr)	Gmb
1	1062.00	620.72	1076.00	2.34
2	1117.50	602.8	1136.0	2.1
3	1166.6	567.8	1074.6	2.3
4	1060.1	583.9	1087.0	2.107
5	1055.9	559.9	1066.7	2.083
6	1055.1	565.6	1067.7	2.101
7	1055.1	563.8	1067.8	2.10
8	1057.2	566.4	1072.8	2.088
9	1058.2	568.6	1071.3	2.105

A continuación se presenta un cuadro resumen con los datos establecidos anteriormente para la elaboración de las briquetas de prueba, en donde se describen los resultados obtenidos.

CUADRO 3.8 Cuadro Resumen para elaborar Briquetas de Prueba

# de briqueta	% emulsion	% humedad	Wagregado	Wba	Wsss	Wbw	Gmb	Gmb prom
1	8.019%	7%	1100	1062.0	1076.0	622.1	2.340	2.1746
2		7%	1050	1117.5	1136.0	604.2	2.101	
3		7%	1000	1055.9	1066.7	559.9	2.083	
4		6%	1000	1058.0	1067.8	563.8	2.099	2.0413
5		6%	1000	1166.6	1175.5	569.2	1.924	
6		6%	1000	1055.1	1067.7	565.6	2.101	
7		5%	1000	1060.1	1087.0	583.9	2.107	2.1000
8		5%	1000	1057.2	1072.8	566.4	2.088	
9		5%	1000	1058.2	1071.3	568.6	2.105	

FUNTE: Presentación propia de los autores.

3.8 MEZCLA ASFALTICA. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

3.8.1 VARIACION DEL CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL

El Procedimiento adoptado es el propuesto por la Universidad de Illinois utilizando el método Marshall modificado, con cualquier grado de emulsión asfáltica y agregados de granulometría densa con tamaño máximo de 1” (25mm). (Se usara como guía el ejemplo Visualizado de Ensayos de Agregados Suelos y Asfalto de FUNDALANAVIAL de Venezuela).

3.8.2 PREPARACION DE LA MEZCLA PARA EL CONTENIDO TEÓRICO DE ASFALTO RESIDUAL.

Contenido Teórico del Asfalto residual: Es el contenido optimo de asfalto para la elaboración de la mezcla mas la tolerancia $\pm 0.5\%$.

Para el diseño propuesto se usara:

Emulsión CSS-1H (Ver figura 3.10), con un 60% de Residuo Asfáltico (R.A.) y un 40% de agua.



FIG 3.10 Emulsión utilizada en el diseño de la mezcla.

Normalmente el manual establece 30 briquetas para la variación del contenido de asfalto residual, 6 por cada contenido, sin embargo para este diseño se harán veinte (20) briquetas, es decir cuatro por cada contenido de asfalto residual determinado a través de la fórmula de Illinois variando el valor del porcentaje óptimo teórico dos (2) puntos por debajo y dos puntos por encima.

Procedimiento:

1. Pesar mil gr. (1000) de agregado seco por briketa (ver apartado 3.6.3).
2. Determinar el peso del agua a añadir a través de la ecuación descrita en el apartado 3.5.1.
3. Calcular el peso de la emulsión utilizando la ecuación descrita en el apartado 3.5.1.
4. Calcular el peso de la humedad a perder antes de compactar, haciendo uso de la ecuación descrita en el apartado 3.6.2.

- Calcular la cantidad de agua a agregar, para alcanzar el contenido óptimo de mezclado haciendo uso de ecuación establecida en apartado 3.5.1.

Con esta información se llena el cuadro 3.9:

CUADRO 3. 9 Cuadro Resumen Para La Determinación Del Porcentaje Óptimo De Asfalto Residual.

MEZCLA Nº	ASFALTO RESIDUAL %	EMULSION %	AGUA EN EMULSION %	EMULSION A SER AÑADIDA		AGUA A SER AÑADIDA		PESO ACUMULAD O MEZCLA (gr)	AGUA A SER ELIMINADA		PESO FINAL ANTES DE COMPACTAR (gr)
				%	gr	%	gr		%	gr	
1	2.76	4,649	1.88	4,649	46.49	3.70	37	1097.99	1	10.93	1087.11
2	3.76	6.33	2,571	6.33	63.3	3.01	30.09	1107.89	1	11.07	1096.93
3	4.76	8,019	3,258	8,019	80.19	2.33	23.32	1118.01	1	11.18	1092.47
4	5.76	9,702	3,942	9,702	97.02	1.64	16.38	1127.9	1	11.27	1102.27
5	6.76	11.40	4.63	11.40	114.0	0.95	9.5	1138.0	1	11.38	1112.26

FUNTE: Presentación propia de los autores.

- Colocar los agregados que fueron pesados en un recipiente.
- Adicionar el agua mezclando hasta que el agua se disperse uniformemente con el agregado (Ver figura 3.11). Esto se logra en un lapso de 1 minuto.



FIG 3.11 Adición y mezclado de Agua para Alcanzar contenido optimo de humedad.

8. Agregar la cantidad de emulsión calculada por la fórmula de Illinois y mezclar durante 1 minuto, hasta que la emulsión se disperse en todo el agregado. Esta cantidad de emulsión se agrega sobre el agregado húmedo (Ver figura 3.12).



FIG 3.12 Colocación del porcentaje de emulsión y mezclado de materiales.

9. Colocar el material una vez mezclado en una bandeja de tal forma que el espesor no sea mayor de 1", para llevar a cabo la aireación y pesar el recipiente con la muestra.
10. Se registra este valor en la planilla de ensayo (ver cuadro 3.17).
11. Restar el peso del agua a perder del peso de la mezcla más el recipiente ver cuadro 3.17
12. Revolver constantemente la mezcla hasta alcanzar las condiciones de compactación.
13. Cuando se haya perdido toda el agua requerida (1%), proceder a compactar la mezcla.
14. El proceso de pérdida de humedad se puede realizar colocando la mezcla en un horno a temperatura menor de 60° C pesando la muestra hasta alcanzar peso constante.

3.9 ELABORACION DE BRIQUETAS DE DISEÑO. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

1. Colocar el molde con el disco de papel en el soporte de compactación.
Verter la mezcla de la bandeja de aireado dentro del molde, sin segregar ni perder material (Ver figura 3.13).



FIG 3.13 Colocación y Distribución del Material dentro del Molde.

2. Punzar la mezcla 15 veces con una pequeña espátula alrededor del perímetro y 10 veces en su interior (Ver figura 3.14).



FIG 3.14 Punzonamiento de mezcla para evitar formación de hormigueros junto a las paredes.

3. Colocar un disco de papel parafinado sobre la mezcla como se observa en la figura 3.15.



FIG 3.15 Colocación de Papel parafinado para evitar perdida de material.

4. Compactar la mezcla con el martillo Marshall (Ver figura 3.16), siguiendo exactamente el procedimiento antes descrito (apartado 3.6.3, sección B).



FIG 3.16 Compactación de mezcla Aplicando Carga con martillo Marshall

5. Rotulación y curado de las briquetas en el molde luego de ser compactadas (Ver figura 3.17), como se detalla en apartado 3.9.1.



FIG 3.17 Rotulación y curado de briquetas

6. Terminado el tiempo de curado (24 horas en el molde y 24 horas en el horno a 38° C), se procede a la determinación de la densidad bulk de cada briqueta. (Ver figura 3.18). Los cálculos para obtener las densidades se detallan en el apartado 3.10.



FIG 3.18 Obtención de densidades para cada briqueta.

7. Determinar al aire la estabilidad y la fluencia de 10 (2 para cada contenido de asfalto residual) de las briquetas elaboradas y someter las

10 restantes a un ensayo de inmersión y vacío parcial como se muestra a continuación en la siguiente figura (figura 3.19).



FIG 3.19 Sistema de inmersión y vacío parcial

3.10 CURADO DE BRIQUETAS DE DISEÑO. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

El curado de las briquetas se realiza como sigue:

Se dejan dentro del molde de compactación a temperatura ambiente por un lapso mínimo de 18 horas, cuidando que la ventilación sea uniforme para ambas caras de la briqueta, luego se extraen del molde con la ayuda de un dispositivo adecuado de extracción “gato hidráulico” (ver figura 3.20). Luego se dejan veinticuatro (24) horas dentro del horno a una temperatura de 38 °C.

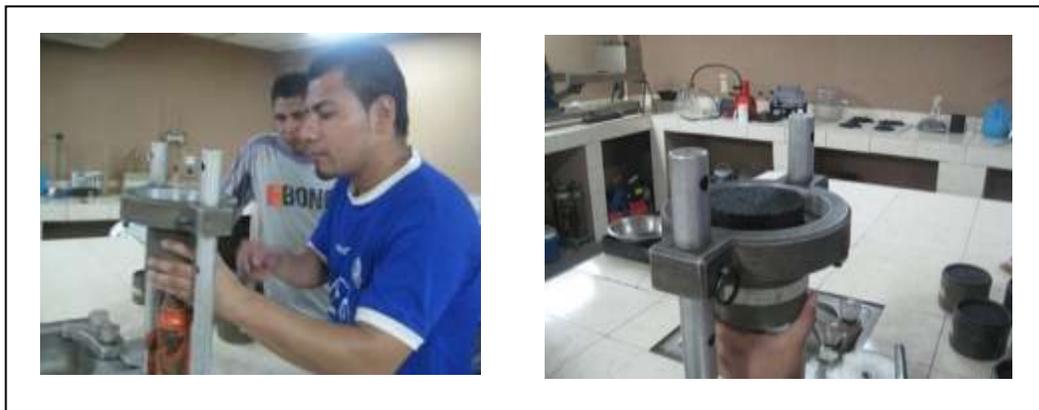


FIG 3.20 Dispositivo de Extracción de Espécimen con gato hidráulico.

3.10.1 ENSAYO DE INMERSION Y VACIO PARCIAL.

Procedimiento:

1. Se sumergen las diez muestras (2 por cada contenido de asfalto residual), en un desecador y se aplica una presión de vacíos constante de 100 mm de mercurio (Hg) durante una (1) hora, luego se disminuye en una hora adicional a razón de 25 mm de mercurio (Hg) cada quince (15) minutos, hasta llegar de nuevo a la presión atmosférica (ver figura 3.19).
2. Se sacan las briquetas del desecador y se dejan al aire por un lapso de tiempo de una (1) hora y se ensayan en la prensa Marshall de acuerdo al Método de prueba Modificada para determinar la Estabilidad y Flujo de cada una de ellas.
3. Se determina el peso de las briquetas, una vez que estas hayan sido falladas y se colocan en el horno para su secado por veinticuatro (24) horas a temperatura de 100 ± 5 °C.
4. Se registran los datos obtenidos y se determina la pérdida de estabilidad comparando los valores obtenidos de las briquetas falladas al aire con los valores de las briquetas falladas después de inmersión y vacío parcial.

3.11 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

Partiendo de los especímenes compactados se determinaran los valores aproximados de los parámetros volumétricos y de la estabilidad. Los parámetros volumétricos a menudo no son evaluados: se los calcula solo como aproximaciones debido a la posibilidad de que haya algo de humedad en los especímenes compactados y curados y al gran número de especímenes necesarios para valores más exactos. (Instituto del asfalto. Manual básico de emulsiones Asfálticas, serie N0. 19).

Se determinará la gravedad específica Bulk según el procedimiento que se señala a continuación y que aparece descrito en las Normas ASTM D 1559 y AASHTO T 225, en el Manual serie N° 19 (MS-19) del Instituto del Asfalto:

3.11.1 GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK (G):

Donde:

W briqueta al aire: Es el peso de la Briqueta en el aire.

W agua: es el peso de la briqueta en el agua.

W_{sss}: es el peso de la briqueta Saturado Superficialmente Seco.

Entonces, para briqueta #1 tenemos:

W agua = 575.3 gr.

W_{sss} = 1034.3 gr.

W briqueta al aire = 1028 gr.

De la misma forma se calculan las restantes Gravedades, de ahí que se muestra el cuadro de resultados de acuerdo al contenido de asfalto residual (Ver anexo 10) donde se resume tal información.

CUADRO 3.10 Gravedad Específica Bulk de las 20 Briquetas Ensayadas.

# DE BRIQUETA	PESO SECO (GR)	PESO SSS (GR)	PESO SUMERGIDO (GR)	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK
1	1028	1034.3	575.3	2.24
2	1029.8	1032.9	570.1	2.23
3	1028	1034.4	576.7	2.25
4	1024.4	1028.6	570.9	2.24
5	1046.3	1055.4	588.1	2.24
6	1045.2	1053.3	587.1	2.24
7	1042.7	1051.4	584.4	2.23
8	1046.8	1055.6	576.9	2.19
9	1041.4	1050.5	591.1	2.27
10	1053.3	1064.2	597.4	2.26
11	1059.8	1069.8	596.9	2.24
12	1058.3	1071.8	598.3	2.24
13	1083.6	1097.5	599.4	2.18
14	1069.6	1086.2	597.8	2.19
15	1060.4	1075.6	599.1	2.23
16	1063.8	1078.4	598.1	2.21
17	1084.7	1104	595.9	2.13
18	1079.6	1097	600.9	2.18
19	1089.1	1110.9	609.3	2.17
20	1079.6	1101.05	600.5	2.16

FUNTE: Presentación propia de los autores.

3.11.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK SECA (Gd):

Donde:

G: es la Gravedad Específica Bulk de la briqueta húmeda.

Gd: Es la Gravedad específica Bulk de la Briqueta Seca.

A: Es el residuo asfáltico contenido por la briqueta en porcentaje del peso del agregado seco.

K: es el contenido de humedad en porcentaje de la briqueta ensayada con respecto al peso del agregado seco.

Entonces, para briqueta #1 tenemos:

❖ _____

3.11.3 DENSIDAD ESPECÍFICA BULK SECA (D).

Donde:

1000: es densidad del agua en $\frac{g}{cm^3}$ a 25 °C.

Los resultados de Gd, D y K de los 20 especímenes se muestran tabulados en el siguiente cuadro:

CUADRO 3.11 Gravedad Específica Bulk Seca (Gd), Densidad Específica Bulk Seca (D). Contenido de Humedad de la Briqueta (K)

#	G	Peso briqueta fallada (g)	P.secada en horno (g)	PSSS (gr)	P. al aire (gr.)	A (%)	K (%)	Gd	Bulk Seca D	G (PROM)
1	2.24	1032.2	1021.3	1034.3	1028	2.76	0.46	2.23	2229.6	2237
2	2.23	1031.4	1020.8	1032.9	1029.8	2.76	0.75	2.21	2208.9	
3	2.25	1032.8	1006.2	1034.4	1028	2.76	2.72	2.19	2188.1	
4	2.24	1025.6	1004.8	1028.6	1024.4	2.76	2.13	2.19	2192.7	
5	2.24	1053.7	1037.3	1055.4	1046.3	3.76	0.73	2.22	2223.3	2225
6	2.24	1052.3	1036.4	1053.3	1045.2	3.76	0.78	2.23	2225.2	
7	2.23	1035.4	1011	1051.4	1042.7	3.76	2.50	2.18	2180.1	
8	2.19	1041.9	1016.6	1055.6	1046.8	3.76	2.58	2.13	2133.6	2250
9	2.27	1047.2	1013.2	1050.5	1041.4	4.76	3.52	2.19	2193.2	
10	2.26	1048.9	1016.7	1064.2	1053.3	4.76	3.32	2.19	2187.1	
11	2.24	1067.7	1048.2	1069.8	1059.8	4.76	0.95	2.22	2220.9	
12	2.24	1069.2	1046.4	1071.8	1058.3	4.76	0.93	2.22	2215.3	2201
13	2.18	1098.7	1057.4	1097.5	1083.6	5.76	4.13	2.09	2093.6	
14	2.19	1088.5	1050	1086.2	1069.6	5.76	3.88	2.11	2112.5	
15	2.23	1080.3	1055.1	1075.6	1060.4	5.76	1.00	2.20	2204.5	
16	2.21	1074.4	1050.2	1078.4	1063.8	5.76	0.97	2.19	2194.8	2160
17	2.13	1097.7	1063	1104	1084.7	6.76	1.55	2.10	2104.3	
18	2.18	1102	1060	1097	1079.6	6.76	4.23	2.09	2093.2	
19	2.17	1106.7	1070.1	1110.9	1089.1	6.76	1.48	2.14	2141.6	
20	2.16	1104.5	1055	1101.0	1079.6	6.76	5.01	2.06	2060.1	

FUNTE: Presentación propia de los autores.

3.11.4 CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA BRIQUETA (K):

Donde:

K: es el contenido de humedad de la Briqueta.

H: es el peso de la Briqueta fallada.

I: es el peso de la Briqueta secada al horno.

F: es el peso SSS.

D: es el peso de la briqueta al aire.

J: es el peso del envase.

A: es el contenido de asfalto residual en la mezcla en %.

Los porcentajes de humedad para las demás briquetas se calculan de igual forma, los resultados se detallan en el anexo 6 de acuerdo a su contenido de residuo asfáltico.

3.12 VACIOS TOTALES. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

3.12.1 VACIOS TOTALES MÁXIMOS EN LA MEZCLA (Vt%):

$$\frac{\frac{C}{B} - 1}{C} \times 100$$

Donde:

C: es la gravedad específica del material combinado.

B: es el peso específico del asfalto.

B: es la densidad de la mezcla compactada.

Para la briketa #1 tenemos:

$$\frac{\frac{C}{B} - 1}{C} \times 100$$

El calculo del porcentajes de de vacios totales para las demás briquetas se realiza de igual forma, los resultados se detallan en el anexo 6 de acuerdo a su contenido de residuo asfáltico.

3.12.2 ABSORCIÓN DE BRIQUETAS (A%):

K1, K2, es el contenido de humedad de la briqueta en condición seca.

K3, K4, es el contenido de humedad de la briqueta saturada al vacío.

Para la briqueta #1 tenemos:

3.13 ENSAYO DE ESTABILIDAD MARSHALL. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

La estabilidad se calcula para las briquetas ensayadas en seco y después de de Saturación al Vacío e Inmersión.

La fórmula para la Estabilidad Marshall “E” en unidades de libras es la siguiente

$$E \text{ (lb)} = -84.7057 + 33.05L_c + 0.0036L_c^2$$

Donde:

L_c: es la lectura de mira del aparato Marshall.

Nota: la fórmula antes mostrada de Estabilidad “E” es exclusivamente para éste aparato del laboratorio del plantel, y se formula a partir de la calibración que se le hace, es decir que la misma fórmula puede variar dependiendo de la calibración que se le haga a otro aparato Marshall.

Para el contenido de asfalto 3.76% tenemos el siguiente cuadro:

CUADRO 3.12 Perdida de estabilidad Marshall

ESTABILIDAD MARSHALL				
ESTABILIDAD LEIDA	72	75	72	71
ESTABILIDAD (lb)= $E=-84.7057+33.05Lc+0.0036Lc^2$	2313.6	2414.3	2313.6	2280.0
ESTABILIDAD CORREGIDA	2313.6	2414.3	2313.6	2244.9
PERDIDA DE ESTABILIDAD (%)	2.4			

Utilizando la ecuación anterior, se calculan las estabilidades para cada espécimen los cuales se detallan en el anexo 10 de acuerdo al contenido de asfalto residual.

3.13.1 CORRECCION DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD

Los valores obtenidos para aquellas muestras que no tengan exactamente la altura 2.5” deben corregirse, aplicando factores de corrección. En base al volumen de la briqueta, se calcula la estabilidad corregida de acuerdo a la expresión:

Donde:

h: altura de la briqueta compactada.

- ✓ Los valores de Estabilidad corregida para grupo de muestras elaboradas con el mismo contenido de asfalto, se promedian, tomándose dicho promedio como valor de estabilidad para ese contenido de asfalto para ser graficado.
- ✓ Debe excluirse del promedio aquel valor que se encuentre notoriamente alejado de los demás.
- ✓ Los valores de flujo obtenidos para todas las muestras elaboradas con determinado contenido de asfalto, se promedian, deberá también descartarse aquel valor que difiera notablemente del promedio si lo hay.

3.14 FLUJO DE LOS ESPECIMENES. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad. El cuadro 3.13 que a continuación se muestra, describe la información para el contenido de asfalto residual 3.76%.

CUADRO 3.13 Flujo y Flujo promedio de los especímenes compactados.

# de Briqueta (especímen)	seca		húmeda	
	1	2	3	4
FLUJO, 1/100 in	11.3	15.3	11.9	12.1

Posteriormente se utilizaran para los diferentes gráficos de análisis. Los resultados de los especímenes restantes aparecen descritos en el anexo 10.

3.15 PERDIDA DE ESTABILIDAD DESPUES DE SATURACION AL VACIO E INMERSION. (MÉTODO MARSHALL MODIFICADO).

La pérdida de estabilidad para las briquetas con el contenido de asfalto de 3.76 después de saturadas al vacío (como se explicó en el apartado 3.12) se muestra a continuación:

Utilizando la siguiente ecuación para la pérdida de estabilidad PE% se tiene:

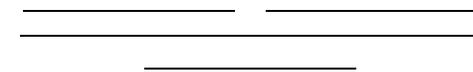
$$\frac{\quad}{\quad}$$

Donde:

S1, S2, S3: son los valores de Estabilidad obtenidos para las briquetas falladas al aire.

S4, S5, S6: son los valores de Estabilidad obtenidos para las briquetas falladas después de inmersión y vacio parcial.

Luego para el contenido de asfalto en la mezcla de 3.76 los valores se muestran en el cuadro 3.14:



CUADRO 3.14 Pérdida de Estabilidad para el Contenido de Asfalto 3.76

ESTABILIDAD MARSHALL				
ESTABILIDAD LEIDA	secas		húmedas	
	72	75	72	71
ESTABILIDAD (lb)= $E = -84.7057 + 33.05Lc + 0.0036Lc^2$	2313.6	2414.3	2313.6	2280.0
ESTABILIDAD CORREGIDA	2313.6	2414.3	2313.6	2244.9
PERDIDA DE ESTABILIDAD (%)	2.4			

Con la información antes descrita en los diferentes apartados se procederá a realizar los Gráficos en el capítulo IV:

- Gravedad Específica Bulk vs. contenido de asfalto residual en %.
- Estabilidad seca y Humedad (lbs.) vs. Contenido de Asfalto Residual en %.
- Pérdida de Estabilidad en % vs. Contenido de Asfalto Residual en %.
- Vacios Totales en Mezcla% vs. Contenido de Asfalto Residual en %.

➤ Flujo en 1/100" vs Contenido de Asfalto Residual en %.

A partir de estos gráficos se obtiene el valor del contenido de asfalto óptimo necesario para completar el diseño; tomando en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El contenido de asfalto óptimo debe ser aquel para el cual se obtenga una óptima estabilidad, cuando se realice el ensayo de estabilidad en condición sumergida, siempre que la diferencia de estabilidad después de la inmersión respecto a la prueba en seco, no sea excesiva.
- la mezcla cuyo contenido de asfalto que se considere óptimo debe poseer un Valor de Vacíos Totales dentro de un rango de 2 a 8% (según el señalado por las Normas).

Finalmente el contenido óptimo de asfalto residual, será aquel que provea el mayor valor de estabilidad sumergida; siempre que este valor pueda ser ajustado por arriba o por debajo dependiendo de la Densidad Máxima Seca Bulk de las briquetas ensayadas en seco, de la absorción de la Humedad, del % de vacíos totales y del cubrimiento del agregado.

CAPITULO IV
ANALISIS E
INTERPRETACION DE
RESULTADOS

4.0 INTRODUCCION.

En este capítulo se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados en el plantel de la empresa (ASFALCA S.A. de C.V), en base al MANUAL CENTROAMERICANO DE ESPECIFICACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES REGIONALES de (SIECA), sección 703.09., donde se establecen las especificaciones que deben cumplir las mezclas y los ensayos de laboratorio de comprobación que sirvan para la aceptación de las mismas.

En el presente análisis se muestra la influencia tanto de la granulometría como de la fuente de agregado en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Para el análisis de los datos se utilizaron procedimientos comunes como son la comparación de las propiedades volumétricas contra el contenido de asfalto Residual Presente en la Emulsión. Utilizando granulometrías que cumplen con las especificaciones establecidas en normas tanto de la AASTHO, como de ASTM.

Una vez determinados los ensayos de densidad para la mezcla asfáltica compactada (Gmb) para las probetas elaboras con la metodología Marshall, se tiene toda la información necesaria para determinar los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, y obtener el contenido óptimo de asfalto.

Las granulometrías y fuentes de agregado empleadas se presentan a detalle en el capítulo 3, además se presenta un resumen de los resultados obtenidos para la mezcla, comparándolos con los valores establecidos por la metodología Marshall.

4.1 ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS A LOS AGREGADOS PETREOS.

Con los respectivos resultados de cada una de las pruebas de laboratorio realizadas a los agregados pétreos, utilizados para el diseño de la mezcla densa en frío, se plantea a continuación el análisis e interpretación (comparación con criterios normados) para cada ensayo.

4.1.1 ANALISIS GRANULOMETRICO

Efectuadas las pruebas granulométricas de las diferentes muestras de agregados pétreos (grava 3/4" y arena triturada), es importante analizar e interpretar los resultados obtenidos, estos se comparan con los criterios señalados en el MANUAL CENTROAMERICANO DE ESPECIFICACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES REGIONALES, sección 703.09. (Agregado para pavimentos con emulsión asfáltica), la cual establece los límites de las granulometrías para los agregados empleados en este diseño. En el cuadro 4.1 se presentan los rangos requeridos de las gradaciones para los agregados pétreos.

CUADRO 4.1 Rangos Requeridos Granulometría Densa para Pavimentos con Emulsión Asfáltica

MALLA	PORCENTAJE POR PESO PASANDO LA MALLA ESTÁNDAR (AASHTO T 27 AAHSTO T 11)				
	DESIGNACION DE LA GRANULOMETRIA				
	A	B	C	D	E
50 mm	100				
37.5 mm	95-100	100			
1" (25 mm)	-	95-100	100		
3/4" (19 mm)	60-80 (7)	-	95-100	100	
1/2" (12.5 mm)	-	60-80 (7)	-	95-100	100
3/8" (9.5 mm)	-	-	60-80 (7)	-	95-100
# 4 (4.75 mm)	20-55 (7)	25-60 (7)	35-65 (7)	45-70 (7)	60-80 (7)
# 8 (2.36 mm)	10-40 (6)	15-45 (6)	20-50 (6)	25-55 (6)	35-65 (6)
# 100 (300 µm)	2-16 (4)	3-18 (4)	3-20 (4)	5-20 (4)	6-25 (4)
# 200 (75 µm)	0-5 (3)	1-7 (3)	2-8 (3)	2-9 (3)	2-10 (3)

() Desviación permisible (±)

FUENTE: Manual Centro Americano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales. SIECA. (Sección 703.09)

El agregado pétreo a utilizar deberá presentar una gradación que cumpla con una de las granulometrías mostradas en el cuadro 4.1. En el presente diseño se emplearon los límites establecidos en la granulometría de la columna C para el análisis de la grava 3/4" y la columna E para el análisis de la arena triturada de dicho cuadro.

En el cuadro 4.2 se presenta el resumen de la granulometría realizada a la muestra de Arena triturada.

CUADRO 4.2 Resumen de Granulometría de Arena Triturada.

RESUMEN GRANULOMETRICO DE ARENA TRITURADA		
MALLAS		% ACUMULADO PASANTE
Pulg	mm	Agregado (ARENA TRITURADA)
		GRANULOMETRIA OBTENIDADA
No.4	4.76	85.49
No.8	2.36	64.11
No.16	1.19	47.40
No.30	0.60	33.13
No.50	0.30	20.48
No.100	0.15	13.03
No.200	0.075	6.37
FONDO	-----	0.00

FUENTE: Presentación propia de los autores.

NOTA: Ver ensayo en apartado 3.2.4 (pág. 123)

Para la muestra de agregado arena triturada, se puede apreciar que los porcentajes pasantes en los tamices correspondientes se encuentran dentro de los límites establecidos por la especificación, por lo tanto se considera que el material cumple con la gradación requerida para ser empleada en el diseño.

A continuación se presenta en el cuadro 4.3 el resumen de los resultados respectivo a la granulometría de la grava 3/4".

CUADRO 4.3 Resumen de Granulometría de Grava 3/4”.

RESUMEN GRANULOMETRICO DE GRAVA 3/4”		
MALLAS		% ACUMULADO PASANTE
Pulg	mm	Agregado (GRAVA 3/4”)
		GRANULOMETRIA OBTENIDADA
3/4”	19	99.17
1/2”	12.5	57.77
3/8”	9.50	35.08
N° 4	4.76	1.45
N° 8	2.36	0.45
N° 16	1.19	0.38
N° 30	0.60	0.36
N° 50	0.30	0.33
N° 100	0.15	0.30
N° 200	0.075	0.25
FONDO	-----	0

FUENTE: Presentación propia de los autores.

NOTA: Ver ensayo en apartado 3.2.4. (pág. 120)

Para la muestra de agregado pétreo Grava 3/4”, se puede apreciar que los porcentajes pasantes en los tamices 3/8”, # 4, # 8, # 50 y # 200 se encuentran fuera de los límites establecidos por la especificación, por lo tanto se considera que el material no cumple con la gradación requerida para ser empleada en el diseño de la mezcla densa en frío, entonces será necesario realizar una combinación de ambas muestras para obtener una granulometría satisfactoria para realizar el diseño.

Para desarrollar la combinación de los materiales se utilizará la banda de especificación empleada en el análisis de la muestra de grava 3/4”. Después de haber combinado ambas muestras con la ayuda de un programa de computación (Hoja de Excel, basado en el Método de la Formula Básica o

Tanteos sucesivos), se logró establecer teóricamente que todos los “porcentajes pasantes” se aproximarán a los límites de la especificación.

Para verificar esta combinación teórica se realiza la combinación de ambas muestras en laboratorio obteniendo los resultados que se presentan en el apartado 3.3 y en el cuadro de Anexo 7 (Ver Ensayo en apartado 3.3).

En el cuadro 4.4 se muestra en resumen los resultados de la granulometría obtenida de la combinación de los materiales pétreos (Grava 3/4” y arena triturada).

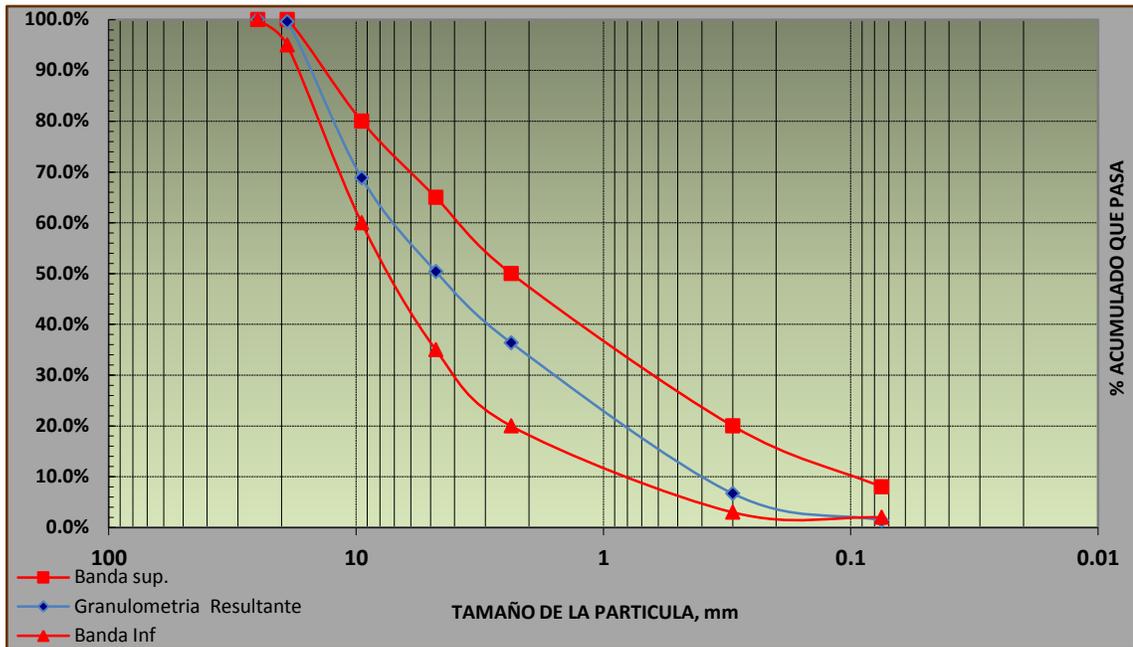
CUADRO 4.4 Resumen de Granulometría Combinado.

RESUMEN GRANULOMETRICO COMBINADO		
MALLAS		% ACUMULADO PASANTE
Pulg	mm	Agregado Combinado (grava-arena)
		GRANULOMETRIA OBTENIDADA
3/4"	19	99.55
3/8"	9.50	76.30
Nº 4	4.76	50.24
Nº 8	2.36	36.54
Nº 50	0.30	8.44
Nº 200	0.075	2.98
FONDO	-----	0.00

FUENTE: Presentación propia de los autores.

NOTA: Ver ensayo en apartado 3.3 (pág. 140)

En la gráfica 4.1 se presenta la curva granulométrica de comprobación obtenida, donde todos los valores obtenidos están dentro de los límites de la especificación.



NOTA: Ver ensayo en apartado 3.3 (pág. 140)

GRAFICO 4.1 Análisis combinado de comprobación.

Con base a los resultados del análisis granulométrico combinado obtenido se puede verificar que el material pétreo empleado es apto para ser usado en el diseño de la mezcla.

4.1.2 ANALISIS DE ENSAYO RESISTENCIA A LA DEGRADACION POR ABRACION E IMPACTO DE LOS AGREGADOS GRUESOS (AASHTO-T 96)

El agregado grueso empleado en el diseño de la mezcla densa en frio debe ser sometido a este ensayo para conocer la calidad del mismo para ser aceptado o rechazado, es por ello que se vuelve importante la realización de la prueba antes mencionada, como también su respectivo análisis de resultado.

La especificación mencionada para este ensayo en el apartado 2.2.4 establece el valor máximo de desgaste de cuarenta por ciento (40%). Los agregados analizados que resulten con valores mayores ha este criterio, no podrán utilizarse para conformaciones de pavimentos.

En el cuadro 4.5 se presenta en resumen, el resultado obtenido al someter al agregado grueso a dicha prueba.

CUADRO 4.5 Resumen de ensayo Resistencia a la Degradación.

ANALISIS DE ENSAYO RESISTENCIA A LA DEGRADACION	
MUESTRA DE GRAVA 3/4"= 5000 gr.	
% DE DESGASTE OBTENIDO	% DE DESGASTE DE ESPECIFICACION (MAX)
15.1	40

FUENTE: Presentación propia de los autores.

NOTA: Ver ensayo en apartado 3.2.5 (pág. 124).

Con base en los resultados se determino, que el material empleado para el diseño, posee un desgaste por debajo de la mitad en relación con la especificación, por lo que se considera un excelente material para la construcción de carpetas de rodadura, ya que este debe ser capaz de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla y las exigencias durante la vida de servicio del pavimento.

4.1.3 ANALISIS DE RESULTADO DE ENSAYO ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS ANTE LA ACCION DEL SULFATO DE SODIO (AASHTO T 104 – 92, ASTM C 88 – 83).

Para medir el grado de resistencia (solidez) de los agregados pétreos, estos son sometidos a la acción de sulfato de sodio o de magnesio para el caso fue solución de sulfato de sodio, esto representa la resistencia de los agregados pétreos frente a la acción de las condiciones ambientales.

La especificación según AASHTO T-104 propone un valor de 12% máximo para agregados a utilizarse en pavimentos con emulsión asfáltica. A continuación se presenta en resumen el resultado de la prueba.

CUADRO 4.6 Resumen de Resultado de Ensayo Estabilidad de los Agregados ante la acción del Sulfato de Sodio.

RESUMEN DE DE ENSAYO ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS ANTE LA ACCION DEL SULFATO DE SODIO.	
MATERIAL: ARENA TRITURADA	
% PERDIDO PESADO	VALOR DE ESPECIFICACION (MAX)
1.3	12

FUENTE: Presentación propia de los autores.

NOTA: Ver ensayo en apartado 3.2.6 (pág. 125)

El valor obtenido debe considerarse únicamente como una estimación preliminar de la resistencia al intemperismo de los agregados ensayados, ya que las condiciones reales de intemperismo a que estarán sujetos los agregados dentro de un proyecto carretero específico, serán las que definirán el verdadero comportamiento de los mismos.

4.1.4 ANALISIS DE RESULTADOS DE ENSAYO GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO. (AASHTO T 85 – 91, ASTM D- C 128 - 88)

Se determina la gravedad específica por dos razones: para permitir el cálculo de los vacíos de las mezclas asfálticas compactadas; y, para corregir las cantidades de agregados empleados en una mezcla para pavimentación cuando su peso específico varía apreciablemente.

Para realizar el respectivo análisis del ensayo, a continuación se presenta el siguiente cuadro donde se resumen los resultados obtenidos al someter a prueba la muestra de material grueso (grava 3/4").

CUADRO 4.7 Resumen de Resultados de Ensayo Gravedad Específica y Absorción.

RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYO GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO				
DESCRIPCION	FORMULA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	VALOR PROMEDIO
PESO ESPECIFICO SECO	$A/(B - C)$	2.58	2.57	2.575
PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUPRFICIE SECA.	$B/(B - C)$	2.61	2.601	2.605
PESO ESPECIFICO APARENTE	$A/(A - C)$	2.659	2.652	2.655
PORCENTAJE DE ABSORCION	$100X(B - C)/A$	1.14	1.199	1.172

FUENTE: Presentación propia de los autores.

NOTA: Ver ensayo detallado en apartado 3.2.7 (pág. 127).

Estos valores pueden ser indicativos de la calidad de los materiales pétreos por ejemplo, absorciones altas indicarán agregados con alto contenido de poros permeables, lo que los vuelve de mala calidad para mezclas de superficie.

Los agregados con gravedad específica menores a dos (2) no son apropiados para mezclas de superficie, ya que pueden catalogarse como agregados livianos propensos a excesiva pulimentación, a causa de las cargas verticales.

4.1.5 ANALISIS DE ENSAYO EQUIVALENTE DE ARENA (ASTM D 2419).

Los resultados de este ensayo indican la proporción relativa de polvo fino o materiales arcillosos perjudiciales contenidos en el agregado empleado en la mezcla asfáltica para pavimentación. Este ensayo es aplicado específicamente a la fracción que pasa por la malla N° 4 (4.75 mm). El cuadro 4.8 que a continuación se presenta, describe en forma resumida los resultados obtenidos.

CUADRO 4.8 Resumen de Resultado de ensayo Equivalente de Arena.

RESUMEN DE ENSAYO EQUIVALENTE DE ARENA	
MUESTRA	EQUIVALENTE DE ARENA
1	87.20%
2	87.50%
PROM	87.4%

FUENTE: Presentación propia de los autores.

NOTA: Ver ensayo detallado en apartado 3.2.9 (pág. 136).

El valor del equivalente de arena de **87.4 %**, será una herramienta mas para la evaluación de la calidad de los materiales. La especificación citada en el apartado 2.2.4 (norma AASHTO T 176) para este ensayo establece un valor de 35% mínimo, lo que indica en base al resultado obtenido es que el material pétreo posee una proporción indeseable de polvo fino de 12.6% en la fracción de agregado que pasa el tamiz No. 4, por lo tanto, el material es aceptable para el diseño de la mezcla usando emulsión asfáltica. Estos valores varían dependiendo del propósito del material ensayo, ya que a mayor cantidad de polvo fino en la mezcla mayor será la cantidad de emulsión a utilizar.

Para la fabricación de la mezcla densa en frío se emplearon los materiales pétreos compuesto de roca basáltica triturada provenientes de la Cantera San Diego en el departamento de La Libertad, los cuales se sometieron a las pruebas de laboratorio respectivas obteniendo buenos resultados, es decir que cumplieron con las características físicas y mecánicas.

La dosificación del material pétreo combinado fue de un 62% de arena triturada y un 48% de grava 3/4" (Ver apartado 3.3.1 pág. 140 – 141), logrando con ello una gradación adecuada para la realización del diseño de la mezcla en frío. En el Anexo 9 se presenta en resumen los resultados de cada una de las pruebas realizadas a los materiales pétreos.

En cuanto a la fabricación de la emulsión asfáltica, ésta se realizó en el laboratorio del plantel de la empresa (ASFALCA S.A. de C.V.), la cual en base a su caracterización se denomina catiónica de rompimiento lento (CSS-1H) con un 60% de Residuo Asfáltico (R.A.) y un 40% de agua.

4.2 ANÁLISIS DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS Y MECANICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.

El fin de los análisis volumétricos es la estimación del contenido de asfalto de la mezcla, objeto de éste diseño.

Con los resultados obtenidos en los ensayos abordados en el capítulo III para determinar las propiedades volumétricas de la mezcla en los diferentes apartados, se procederá a realizar los siguientes Gráficos:

- ❖ Vacíos en el Agregado Mineral en % Vrs. Contenido de Asfalto Residual %.
- ❖ Gravedad Específica Bulk Vrs. Contenido de Asfalto Residual en %.
- ❖ Pérdida de Estabilidad en % Vrs. Contenido de Asfalto Residual en %.
- ❖ Estabilidad Seca y Húmeda (lbs.) Vrs. Contenido de Asfalto Residual en %.
- ❖ Flujo en 1/100" Vrs. Contenido de Asfalto Residual en %.

A partir de estos gráficos se obtiene el valor del contenido de asfalto óptimo necesario para completar el diseño.

4.2.1 ESTABILIDAD SECA Y HUMEDA Vrs. CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL %(ASTM D 1559- AASHTO T245-MS 14).

Los resultados logrados del ensayo se presentan en el cuadro 4.10.

Analizando el gráfico de Estabilidad y comparando los resultados obtenidos de la Estabilidad húmeda contra la Estabilidad seca, se puede mencionar que existe una disminución leve entre el 2.0% a 5.7% de la estabilidad húmeda con respecto a la estabilidad seca (la Pérdida de de Estabilidad se analiza en detalle en el apartado 4.2.4), esto se debe a que los especímenes fueron sometidos a condiciones de saturación durante dos (2) horas en el Desecador y ensayados en la condición superficie saturada superficialmente seca (SSS), esta condición nos permite evaluar la susceptibilidad de la mezcla frente al agua, lo cual se ha demostrado en base a los resultados que existe una pérdida de cohesión en la mezcla. Básicamente se trató de poner de manifiesto uno de los mayores problemas que produce la presencia de agua en una mezcla asfáltica: la pérdida de cohesión con la consiguiente disminución de la capacidad portante de la misma. Con tal motivo se procedió a evaluar la resistencia de la mezcla compactada en su estado “seco” como así también luego de un determinado período de inmersión en agua, de modo de cuantificar desde este punto de vista los efectos, en los aspectos mecánicos originados por el contacto de la mezcla asfáltica con el agua. El valor tomado de estabilidad de la mezcla asfáltica es aquel que proporciona la mayor estabilidad en condición húmeda, cuidando que el contenido de asfalto al cual pertenezca este punto sea tal que al entrar en los siguientes gráficos (Vacíos Totales, Gravedad Bulk, Pérdida de Estabilidad y Flujo), cumpla con los parámetros establecidos por la norma.

El valor tomado para este caso fue de de 1850 lb lo cual lleva a tener un contenido de asfalto residual de 5% tal como se muestra en el grafico 4.2. Éste valor está muy por encima del mínimo establecido en las normas (750 lb min), por otro lado los valores de la estabilidad seca están ligeramente por encima de la húmeda, sin embargo solo se toman los valores de la estabilidad húmeda porque es el caso más crítico.

CUADRO 4.10 Resultados de estabilidad de Briqueta Seca y Húmeda para Diferentes Contenido de Asfalto Residual (%).

CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL %	ESTABILIDAD SECA (lb)	ESTABILIDAD HUMEDA (lb)	PERDIDA DE ESTABILIDAD (%)
2.76	3070.7	3003.2	3.9
3.76	2363.9	2279.2	2.4
4.76	2193.9	2162.1	2.4
5.76	1479.6	1447.3	1.7
6.76	840.8	799.8	5.7

Fuente: presentación propia de los autores

Nota: Ver apartado 3.13 (pág. 170)

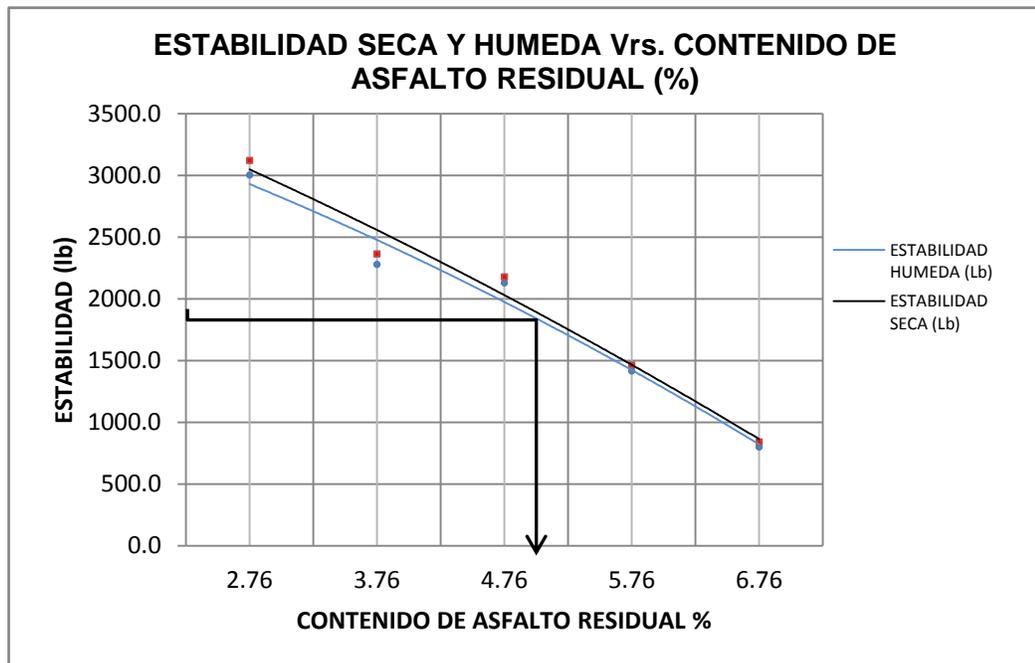


GRAFICO 4.2 Estabilidad de Briquetas en Condición Seca y Húmeda con Diferentes Porcentajes de Asfalto Residual en la Emulsión Asfáltica.

4.2.2 VACIOS TOTALES MAXIMOS VTM % Vrs. CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL (%) (ASTM D 1559- AASHTO T245-MS 14).

Los Vacios Totales Máximos (VTM) son los espacios intergranulares ocupados por el aire más humedad en la mezcla asfáltica compactada y se expresa como porcentaje del volumen total.

Los valores mostrados en la cuadro 4.11 son los equivalentes a cada contenido de asfalto residual, inicialmente los valores de VTM disminuyen de 9.9% hasta un valor mínimo de 7.1% al incrementar el contenido de asfalto residual como se presenta en el grafico 4.3, luego aumenta hasta un máximo de 9.2% cuando el porcentaje de asfalto residual está en el punto más alto, exhibiendo una curva en forma de U.

A medida que se incrementa el contenido de asfalto en la mezcla, ésta se vuelve más trabajable y se compacta más fácilmente, luego en algún punto del rango más bajo de Porcentaje de Asfalto Residual (3.76% - 5.76%), cuando el contenido de asfalto sigue aumentando, el VTM empieza a incrementarse debido a la mayor dificultad en la compactación, por consiguiente, la Gravedad Específica Bulk de la mezcla disminuye al aumentar los VTM causados por el aumento excesivo del residuo asfáltico.

Para determinar el porcentaje de Vacios Totales Máximos presentes en la mezcla compactada y que se adecue a la cantidad de Porcentaje de Asfalto Residual Obtenido en el apartado 4.2.1 para una Optima estabilidad se hace lo siguiente: en el grafico 4.3 se entra con el 5% de Asfalto Residual y se obtiene el VTM que para éste caso fue de 7.1 %.

CUADRO 4.11 Resultados de Vacios Totales Máximos Para Diferentes Contenido de Asfalto Residual en %.

CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL %	VACIOS TOTALES MÁXIMOS VTM. (%)
2.76	9.9
3.76	8.4
4.76	7.5
5.76	7.1
6.76	9.2

Fuente: presentación propia de los autores.

Nota: Ver apartado 3.12.1 (pág. 169).

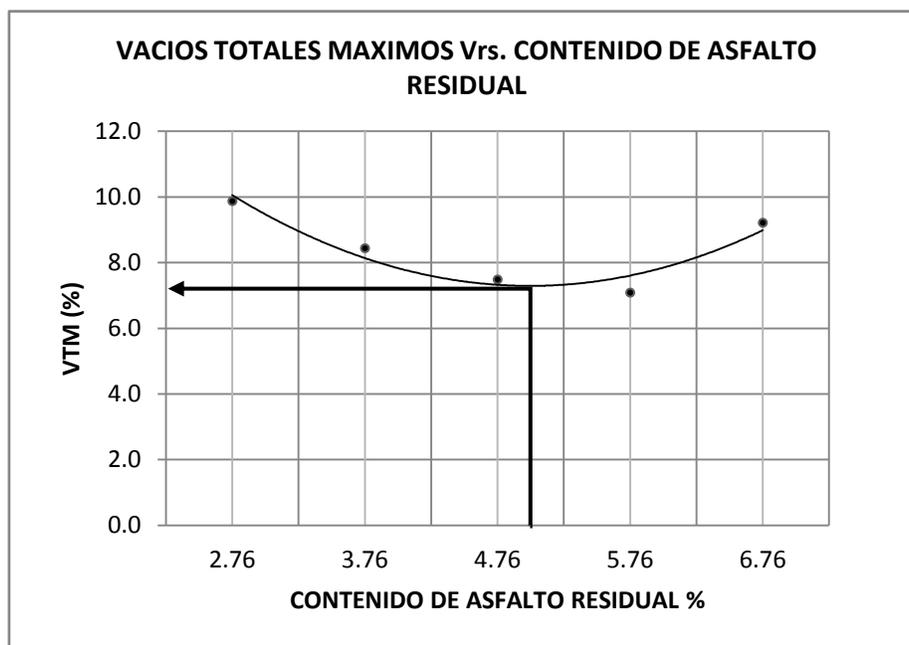


Gráfico 4.3 Vacios Totales Máximos en las Briquetas con Diferentes Contenidos de Asfalto Residual.

4.2.3 GRAVEDAD ESPECIFICA BULK Vrs. CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL EN % (ASTM D 1188, D 2726, AASHTO T 166)

Otro aspecto considerado en el estudio fue la Gravedad Especifica Bulk seca de la briqueta. Una vez realizado el ensayo de las veinte (20) Briquetas se obtuvieron los resultados mostrados en el cuadro 4.12,

Para determinar la Gravedad Especifica Bulk presente en la mezcla compactada se hace lo mismo que en el apartado 4.2.2. Se entra con el 5% de

Asfalto Residual y se obtiene el Valor de la Gravedad que se adecue a la cantidad de Asfalto Residual Obtenido en el apartado 4.2.1.

Para éste caso el valor de la Gravedad Bulk fue de 2.230 representado en el grafico 4.4.

CUADRO 4.12 Resultados de la Gravedad Específica Bulk (promedio) para los Diferentes Contenido de Asfalto Residual.

CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL %	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK PROMEDIO
2.76	2.237
3.76	2.233
4.76	2.250
5.76	2.201
6.76	2.160

Fuente: presentación propia de los autores.

Nota: Ver apartado 3.11.1 - 3.11.2- 3.11.3 (pág. 165-168)

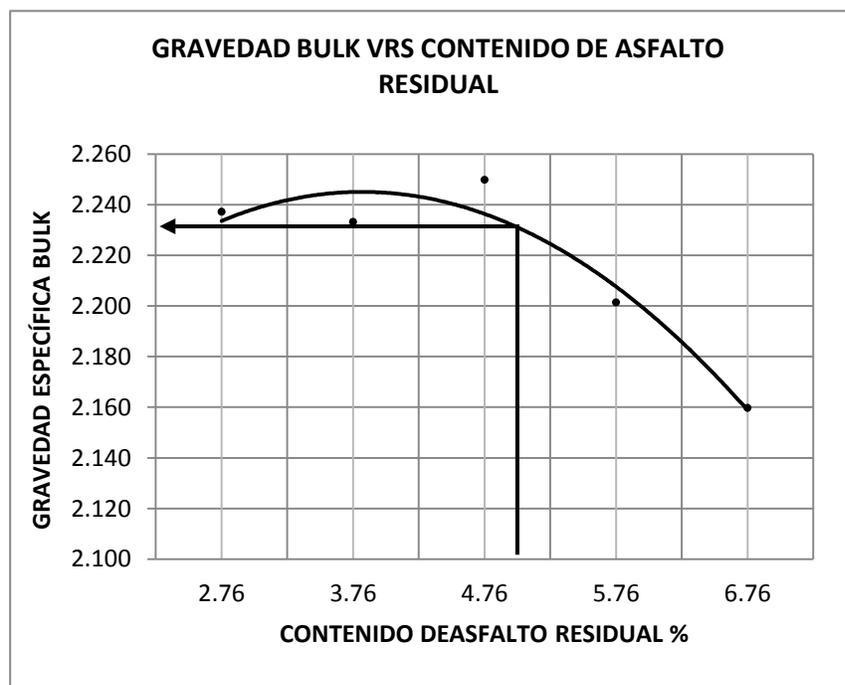


Grafico 4.4 Gravedad Específica Bulk (promedio) de Briquetas para Diferentes Contenido de Asfalto Residual

4.2.4 PERDIDA DE ESTABILIDAD (%) Vrs. CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL%. (ASTM D 1559, AASHTO T 245 y M S – 14)

Para las probetas elaboradas en el diseño de la mezcla (veinte briquetas) se emplearon dos (2) grupos de probetas, ambos grupos curados veinticuatro (24) horas al aire, uno de estos grupos se ensayo en seco, el otro se sometió a un ensayo de Inmersión y Vacío Parcial en el desecador.

La pérdida de Estabilidad para un contenido de Asfalto Residual de 5% es de 1.9% como se muestra en el gráfico 4.5 obviamente éste valor se encuentra bajo el mínimo establecido por la Norma (5 máx.), ésta pérdida de estabilidad surge a partir de la diferencia de estabilidad al ensayar las briquetas en estado seco y estado húmedo como se muestra en cuadro 4.10 y cuadro 4.13, se observa particularmente la tendencia a perder mayor estabilidad cuando el contenido de Asfalto Residual es muy bajo o muy alto (3.9%, 5.7%, sin embargo aun así esta pérdida no es significativa, ya que bajo esta condición de humedad la mezcla tendería a mantener la cohesión interna.

Es conveniente comentar que, generalmente, para las emulsiones catiónicas y aniónicas, este valor (pérdida de estabilidad) disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto residual. (Instituto del asfalto. Manual, serie N0. 14).

En nuestro caso esto no ocurre, como se muestra en el grafico 4.5; sin embargo, el valor de Pérdida de Estabilidad obtenido de aproximadamente del 1.9%, cumpliendo con las especificaciones para carpetas de rodamiento, este valor supera al máximo establecido en la Norma (5%).

CUADRO 4.13 Resultados de Pérdida de Estabilidad (%) de Briquetas Secas y húmedas para los Diferentes Contenido de Asfalto Residual.

CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL %	PERDIDA DE ESTABILIDAD (%)
2.76	3.9
3.76	2.4
4.76	2.4
5.76	1.7
6.76	5.7

Fuente: presentación propia de los autores

Nota: Ver apartado 3.15 (pág. 172-173)

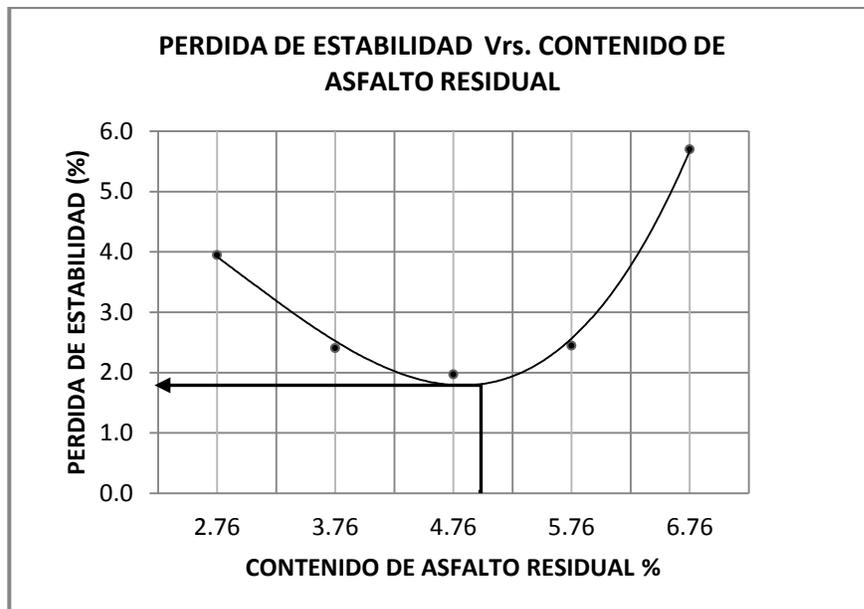


Grafico 4.5 Pérdida de Estabilidad (%) de Briquetas Secas y Húmedas para Diferentes Contenido de Asfalto Residual%.

4.2.5 FLUJO DE BRIQUETA SECA Y HUMEDA Vrs. CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL EN % (ASTM D 1559 Modificada, AASHTO T245, MS 14)

Para este ensayo los especímenes divididos en dos (2) grupos (dos briquetas por cada contenido de asfalto residual), ambos grupos curados

veinticuatro (24) horas al aire en el molde. Uno de estos grupos se ensayo en seco, el otro se sometió a un ensayo de Inmersión y Vacío Parcial en el desecador y se ensayo en húmedo. El segundo grupo de probetas se curó únicamente al aire por tres días después de desmoldar.

Los valores reportados en las pruebas tanto de briquetas húmedas como secas se muestran en el cuadro 4.14.

Como se muestra en el grafico 4.6, los valores de flujo aumentan con los incrementos en el contenido de Asfalto Residual hasta un máximo de 19.5 1/100". El valor de flujo para el contenido de asfalto residual optimo presentó un valor de flujo de 14 1/100" el cual está dentro del límite de la especificación (3 min – 18 max), y para el cual el Contenido de de Asfalto es el calculado en apartado 4.2.1 de 5%.

CUADRO 4.14 Resultados del Flujo de Briqueta Seca y Húmeda Para Diferentes Contenido de Asfalto Residual.

CONTENIDO DEASFALTO RESIDUAL %	FLUJO, 1/100 in prom. (SECAS)	FLUJO, 1/100 in prom. (HUMEDAS)
2.76	9.3	11.5
3.76	11.3	12.0
4.76	15.1	14.5
5.76	15.5	15.8
6.76	17.5	19.5

Fuente: presentación propia de los autores

Nota: Ver Ensayos 3.14 (pág. 172)

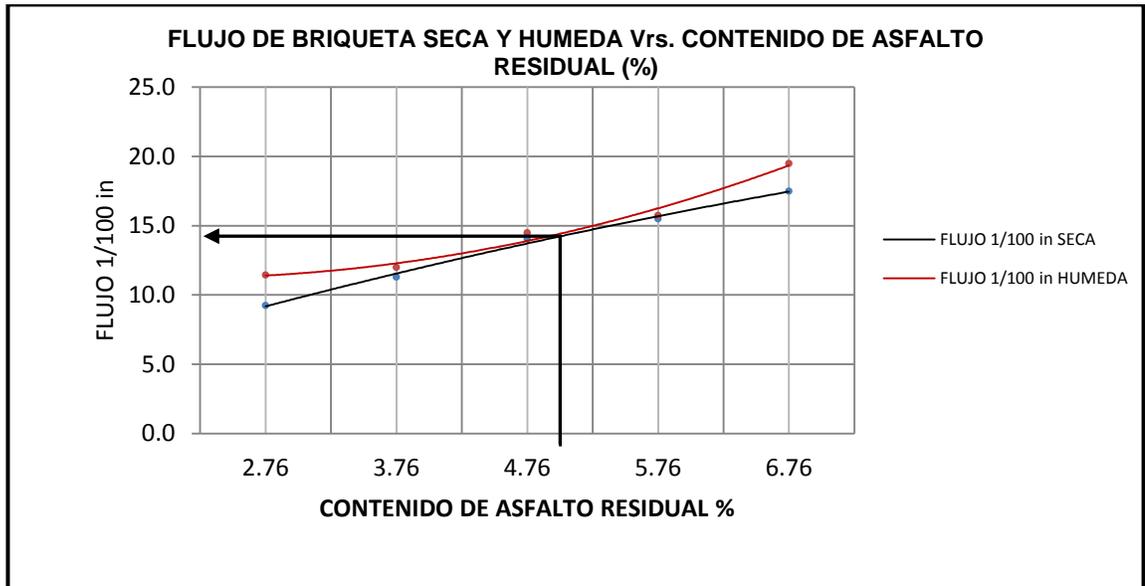


Grafico 4. 6 Flujo de briquetas en Condición Seca y Húmeda con Diferentes Contenido de Asfalto Residual.

4.2.6 RESULTADOS DEL DISEÑO MARSHALL MODIFICADO MÉTODO ILLINOIS, Y PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO RESIDUAL.

A partir de los gráficos anteriores se obtienen los valores finales para cada criterio establecido en las normas.

El Porcentaje Optimo de Asfalto Residual necesario para completar el diseño y con el cual los diferentes criterios evaluados cumplen con las normas es:

Contenido de Asfalto Residual a utilizar en la mezcla es: **5%**

Las propiedades mecánicas para la mezcla de material triturado, arena, grava y emulsión determinado por el diseño Marshall Modificado junto con los parámetros de diseño son las siguientes:

CUADRO 4.15 Parámetros del Diseño Marshall Modificado (ASTM D 1559, AASHTO T 245 y M S – 14) y resultados del Diseño

PARÁMETROS	CRITERIO DE DISEÑO, MÉTODO MARSHALL		RESULTADO DE DISEÑO
	Mínimo	Máximo	
Numero de golpes de compactación en cada extremo de la briqueta para mezclas con Emulsión.	50	75	50
Graved seca bulk, Gmb	----	----	2.230
Vacios de aire en la Mezcla (%)	3	8	7.1
Estabilidad Seca a 22°C, (Lb)	----	----	1900
Estabilidad húmeda a 22°C (Lb)	750	1200	1850
Pérdida de estabilidad, %	----	5	1.9
Flujo, 1/100 in (Húmeda)	8	16	14
% de Asfalto Residual Óptimo	----	----	5

CAPITULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.

Luego de haber realizado el estudio investigativo sobre el Diseño de Mezclas Asfálticas Densas en Frio basado en la Metodología Marshall Modificada, se pueden considerar las siguientes conclusiones:

- La selección final de la fuente de materiales (cantera San Diego), fue un aporte importante para la calidad final de la mezcla ya que los materiales ensayados (grava 3/4", arena triturada) cumplieron con las exigencias de las normas aplicables en cuanto a dureza, limpieza, desgaste, angulosidad y sanidad.
- Se logró constatar que se cuenta con especificaciones técnicas y normas para el diseño de mezclas en Frio; están contenidas en las especificaciones del MANUAL CENTROAMERICANO DE ESPECIFICACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES REGIONALES (SIECA), secciones 703.09 y 406. En estas se establecen recomendaciones sobre el uso de éste tipo de mezcla en pavimentos, además de las normas AASHTO, ASTM, manual MS 14, manual MS 19, así como otras normas que respaldan este tipo de mezcla (normas mexicanas para mezclas en Frio, Normas Colombianas, venezolanas entre otras).
- La banda granulométrica escogida del MANUAL CENTROAMERICANO DE ESPECIFICACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES REGIONALES (SIECA) fue determinante en la gradación del material pétreo combinado, ya que la cantidad de emulsión utilizada en la mezcla de prueba está afectada directamente por esta.

- De acuerdo a los resultados de la investigación realizada se logró determinar que los parámetros mecánicos (estabilidad y flujo, ver cuadro 4.15) obtenidos en la Mezcla en Frio, son los mismos que se demandan para un diseño de mezcla en caliente bajo la metodología Marshall, por tanto a partir de esto se deduce que una mezcla en frio es tan aceptable como lo es una mezcla en caliente.
- La técnica de mezclas en frio es una buena alternativa de pavimentación, ya sea que se use para mantenimiento rutinario (bacheo) o como carpeta de rodadura, pues optimiza recursos económicos (en comparación con el costo económico que poseen otras mezclas asfálticas), al realizar su aplicación en un tiempo relativamente corto y sin molestias mayores al tráfico además de minimizar el impacto ambiental negativo.
- De los ensayos efectuados a la mezcla estudiada, puede inferirse que para el caso particular que nos ocupa, una dotación del 5% de Contenido de Asfalto Residual en la emulsión resulta el adecuado, ya que con este valor se cumple con los parámetros de estabilidad, vacíos totales, densidad y flujo en la mezcla, establecidos por el diseño Marshall Modificado como requisitos (cuadro 3.15).

5.2 RECOMENDACIONES.

- Para el diseño de una mezcla Asfáltica Densa en Frio el tipo de agregado a utilizar puede proceder de cualquier banco de material, siempre y cuando se tengan resultados satisfactorios en la caracterización de los mismos.
- El desmoldado de los especímenes se recomienda efectuarlo veinticuatro (24) horas o más después de haber finalizado el proceso de compactación de la mezcla (el método de diseño de mezclas en frio de la Universidad de Illinois establece 18 horas como mínimo) para que las probetas no se fracturen o se disgreguen y pierdan material durante el proceso de desmoldado.
- Los resultados han sido obtenidos en laboratorio, simulando las condiciones de trabajo lo mejor posible. Es necesario hacer pruebas de campo. Estos resultados proporcionan una guía bastante confiable del comportamiento de este tipo de mezcla bajo condiciones reales, tales como el tipo de tráfico, el clima predominante, posición geográfica, entre otros.
- Para futuros diseños de mezclas en frio se recomienda hacer uso de la metodología SUPERPAVE, que aunque no se menciona ni se abordo en este estudio, se sabe que es la nueva tendencia de los diseños de mezclas, por ser una metodología completa.
- Los resultados finales del diseño con el Método Marshall Modificado son satisfactorios, se recomienda aplicar el estudio para un tipo de tráfico pesado.

BIBLIOGRAFIA

- Ángel Leónidas Antonio Maldonado Merino. Guía para el Control y el Aseguramiento de la Calidad de Construcción de Pavimentos Flexibles Elaborados con Mezclas Asfálticas en Caliente en El Salvador. Trabajo de graduación, escuela de Ingeniería Civil, UES. Julio, 2006.
- Apuntes técnicos de la empresa ASFALCA (Asfaltos de Centroamerica, S.A. de C.V.).
- Carmen Elena Rodríguez Mineros y Otros. Evaluación y Rehabilitación de Pavimentos Flexibles por el Método del Reciclaje. Trabajo de graduación, escuela de Ingeniería Civil, UES. Agosto 2004.
- Dirección General de Caminos, Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. República de Guatemala.
- Especificaciones para la Construcción de carreteras y Puentes Regionales. Convenio No. 596-0184.20, PROALCA II, SIECA. FUNDEVI LANAMME Consultora. 2da. Edición. 2da. Edición.
- Fabio A. Méndez Pinilla y otros. Mezcla Densa En Frío, Pavimentación de la Vía Quibdo-yuto. Boletín Informativo. Departamento del Chocó-Colombia.

- Gustavo Rivera Escalante. Emulsiones Asfálticas. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. México. Tercera Edición 1987.
- Ingenieros Consultores de Centro América, S. A. Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes.
- Instituto del asfalto, Principios de Construcción de Pavimentos de Mezclas Asfálticas en Caliente. Manual Series N° 22
- Instituto del asfalto. Manual básico de emulsiones Asfálticas. Manual series N0. 19.
- Jorge Coronado Iturbide, Consultor. Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimentos. Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA). Noviembre.2002.
- Manual Visualizado para el Diseño de mezclas Asfálticas en Frio, Versión #2. Ministerio de Infraestructura, Fundación Laboratorio Nacional de vialidad, FUNDALANAVIAL. Noviembre de 2003 Venezuela.
- María René Escobar Morales et. al, Informe de la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial, "Selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en Caliente en El Salvador "San Salvador, junio 2010.
- Miró Recasens, R. Metodología para la Caracterización de Ligantes Asfálticos Mediante el Empleo del Ensayo Cántabro. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. (1994).

- Paul Garnica Anguas y otros. Análisis Comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para Compactación de Mezclas Asfálticas. Publicación Técnica No 271. Instituto mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro, 2005.
- Paul Garnica Anguas y otros. Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas. Publicación Técnica No 246. Instituto mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro, 2004.
- Rogelio Rodríguez Talavera y otros. Emulsiones Asfálticas. Documento Técnico No. 23. Instituto mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro, 2001.
- Wilfredo González Escobar y otros, Guía básica para el uso de emulsiones asfálticas en la estabilización de bases en caminos de baja intensidad en El Salvador. Trabajo de graduación, escuela de Ingeniería Civil, UES noviembre 2007.

DIRECCIONES DE INTERNET:

- www.asphaltinstitute.org
- www.imt.mx
- www.sct.gob.mx
- www.ASFALCA.com.sv
- www.es.wikipedia.org
- www.multipav.com.sv

ANEXOS

ANEXO 1 Formato para cálculo de ensayo granulométrico (material pétreo Grava 3/4").

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 LABORATORIO DE PLANTA DISEÑADORA DE MEZCLAS ASFALTICAS (ASFALCA S.A)



SOLICITANTE: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 PROYECTO : TRABAJO DE GRADO DISEÑO DE MEZCLA ASFALTIACA DENSA EN FRIO.
 PROCEDENCIA: LA CANTERA S.A de C.V
 UBICACIÓN: SAN DIEGO, LA LIBERTAD

MATERIAL: GRAVA 3/4"
 FECHA DE ENSAYO: 03/05/2010

MALLA	mm	PESO RETENIDO	PESO RETENIDO AJUSTADO	% RETENIDO		% ACUMULADO QUE PASA
				PARCIAL	ACUMULADO	
3/4"	19	45.20	45.20	0.83	0.83	99.17
1/2"	12.5	2251.90	2251.90	41.40	42.23	57.77
3/8"	9.50	1234.30	1234.30	22.69	64.92	35.08
Nº 4	4.76	1829.60	1829.60	33.63	98.55	1.45
Nº 8	2.36	54.30	54.30	1.00	99.55	0.45
Nº 16	1.19	3.80	3.80	0.07	99.62	0.38
Nº 30	0.60	1.50	1.50	0.03	99.64	0.36
Nº 50	0.30	1.30	1.30	0.02	99.67	0.33
Nº 100	0.15	1.80	1.80	0.03	99.70	0.30
Nº 200	0.075	2.70	2.70	0.05	99.75	0.25
FONDO	0.001	6.10	13.60	0.11	100	0
TOTALES		5432.50	5440.00	100		

PESO INICIAL: 5440.0 gr
 PESO TARA: 358 gr
 NOTA: _____

GRAVAS: 98.55%
 ARENAS: 1.20%
 FINOS: 0.25%

SUMA

100%

ANEXO 2 Formato para cálculo de ensayo granulométrico (material pétreo Arena Triturada)

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE EMPRESA DISEÑADORA DE MEZCLAS ASFALTICAS ASFALCA S.A



ENSAYO GRANULOMETRICO
ASTM C 136 - 84A

Solicitante: Universidad de El Salvador
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Diseño de mezcla en Frio"
 Procedencia: La Cantera S.A. de C.V.
 Ubicación: San Diego, La Libertad

Material: Arena Triturada
 Fecha de ensayo: 07-May-10

Peso inicial sin lavar: 1385.6 Material fino por lavado 84
 Peso seco lavado: 1301.6

MALLA	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO		% ACUMULADO QUE PASA
		PARCIAL	ACUMULADO	
No.4	201.00	14.51	14.51	85.49
No.8	296.30	21.38	35.89	64.11
No.16	231.50	16.71	52.60	47.40
No.30	197.80	14.28	66.87	33.13
No.50	175.20	12.64	79.52	20.48
No.100	103.20	7.45	86.97	13.03
No.200	92.30	6.66	93.63	6.37
Pasa No. 200	88.30	6.37	100.0	0.00
Σ	1385.6	100.0		

PESO

INICIAL 1385.6 gr

GRAVAS

14.51 %

PESO

TARA

103.6 gr

ARENAS

79.12 %

FINOS

6.37 %

TOTAL

100 %

ANEXO 3

Formato para Ensayo de Resistencia a la Abrasión e Impacto en la Maquina de Los Angeles.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE EMPRESA DISEÑADORA DE MEZCLAS ASFALTICAS ASFALCA S.A



ENSAYO DE RESISTENCIA A LA ABRACION E IMPACTO EN LA MAQUINA DE
LOS ANGELES
AASHTO T 96 – 92, ASTM C 131 – 89.

Solicitante: Universidad de El Salvador
Proyecto: Trabajo de Graduación “Mezcla en Frio”
Procedencia: La Cantera SA de CV
Ubicación: San Diego, La Libertad

de esferas: 11
Fecha de ensayo: 03/05/10

PESO INICIAL (gr)	PESO RETENIDO EN MALLA # 12	DIFERENCIA (gr)	% DE DESGASTE
5000	4246	754.0	15.1

ANEXO 4

Formato para calculo Ensayo de Agregado para la Determinación de la Sanidad.

UNIVERSIDAD D EL SALVADOR FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA LABORATORIO DE DE EMPRESA DISEÑADORA DE MEZCLAS ASFALTICAS ASFALCA S.A																																																	
METODO ESTANDAR PARA LA SANIDAD DE LOS AGREGADOS POR EL USO DE SULFATO DE SODIO O SULFATO DE MAGNESIO. ASTM C - 88																																																	
PROYECTO: <u>Trabajo de Grado Diseño de Mezcla en Frio.</u>																																																	
UBICACIÓN: <u>San Diego, La Libertad.</u>																																																	
SOLICITANTE: <u>Universidad de El Salvador.</u>																																																	
MATERIAL <u>Arena Triturada.</u>				REACTIVO: Sulfato de Sodio																																													
				FECHA DE ENSAYO: 11-May-10																																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">MALLAS</th> <th rowspan="2" style="text-align: center;">GRADUACION DE LA MUESTRA ORIGINAL</th> <th rowspan="2" style="text-align: center;">PESO DE LA FRACCION ANTES DEL ENSAYO</th> <th rowspan="2" style="text-align: center;">% QUE PASA LA MALLA DESIGNADA</th> <th rowspan="2" style="text-align: center;">% PERDIDO PESADO</th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">PASA</th> <th style="text-align: center;">RETENIDO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">3/8"</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">--</td> <td style="text-align: center;">-</td> <td style="text-align: center;">-</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">27.6</td> <td style="text-align: center;">100.0</td> <td style="text-align: center;">0.4</td> <td style="text-align: center;">0.1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">16</td> <td style="text-align: center;">21.4</td> <td style="text-align: center;">100.0</td> <td style="text-align: center;">1.4</td> <td style="text-align: center;">0.3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">16</td> <td style="text-align: center;">30</td> <td style="text-align: center;">14.3</td> <td style="text-align: center;">100.0</td> <td style="text-align: center;">3.5</td> <td style="text-align: center;">0.5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">30</td> <td style="text-align: center;">50</td> <td style="text-align: center;">11.5</td> <td style="text-align: center;">100.0</td> <td style="text-align: center;">3.4</td> <td style="text-align: center;">0.4</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: right;">TOTAL</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">1.3</td> </tr> </tbody> </table>						MALLAS		GRADUACION DE LA MUESTRA ORIGINAL	PESO DE LA FRACCION ANTES DEL ENSAYO	% QUE PASA LA MALLA DESIGNADA	% PERDIDO PESADO	PASA	RETENIDO	3/8"	4	5	--	-	-	4	8	27.6	100.0	0.4	0.1	8	16	21.4	100.0	1.4	0.3	16	30	14.3	100.0	3.5	0.5	30	50	11.5	100.0	3.4	0.4	TOTAL				1.3	
MALLAS		GRADUACION DE LA MUESTRA ORIGINAL	PESO DE LA FRACCION ANTES DEL ENSAYO	% QUE PASA LA MALLA DESIGNADA	% PERDIDO PESADO																																												
PASA	RETENIDO																																																
3/8"	4	5	--	-	-																																												
4	8	27.6	100.0	0.4	0.1																																												
8	16	21.4	100.0	1.4	0.3																																												
16	30	14.3	100.0	3.5	0.5																																												
30	50	11.5	100.0	3.4	0.4																																												
TOTAL				1.3																																													

ANEXO 5

Formato para cálculo de ensayo gravedad específica y absorción agregado pétreo.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE. DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA LABORATORIO DE EMPRESA DISEÑADORA DE MEZCLAS ASFALTICAS ASFALCA S.A.				
DETERMINACION DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO ASTM C 127				
Proyecto: Trabajo de Grado "Diseño de Mezcla en Frio"		Material: Grava 3/4"		
Ubicación: San Diego, La Libertad				
Procedencia: La Cantera.				
MUESTRA N°	1	2	PROMEDIO	
PESO DE LA MUESTRA AL AIRE SECADA EN HORNO (A)	1536.4	1593.4		
PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (B)	1554	1612.5		
PESO DE LA MUESTRA SATURADA EN AGUA (C.)	958.6	992.5		
B - C	595.4	620		
A - C	577.8	600.9		
B - A	17.6	19.1		
PESO ESPECIFICO SECO	A/(B - C)	2.58	2.57	2.575
PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUPERFICIE SECA.	B/(B - C)	2.61	2.601	2.605
PESO ESPECIFICO APARENTE	A/(A - C)	2.659	2.652	2.655
PORCENTAJE DE ABSORCION	100X(B - C)/A	1.14	1.199	1.172

ANEXO 6

Formato para cálculo de Ensayo Equivalente de Arena.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR			
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE			
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA			
LABORATORIO DE EMPRESA DISEÑADORA DE MEZCLAS AFALTICAS ASFALCA S.A.			
EQUIVALENTE DE ARENA AASHTO T 176 - 86, ASTM D 2419 – 91			
Proyecto: Trabajo de Graduación "Mezcla en Frio"			
Ubicación: San Diego, La Libertad			
Solicita: Universidad de El Salvador			Fecha de ensayo: 11/05/10
Procedencia: La Cantera S.A. de C.V.			
material: Arena Triturada			
MUESTRA	H (Altura original de la arena antes de introducir el pistón	h (Altura de la arena después de introducir el pistón	EQUIVALENTE DE ARENA
1	4.1	4.7	87.20%
2	4.2	4.8	87.50%
			X = 87.4 %

ANEXO 7 Análisis Granulométrico Combinado de Agregados Pétreos (Grava ¾" y Arena triturada).

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
LABORATORIO DE LA PLANTA DISEÑADORA DE MEZCLAS ASFALTICAS ASFALCA S.A



ENSAYO GRANULOMETRICO COMBINADO ASTM C 136

Solicitante: Universidad de El Salvador
 Proyecto: Trabajo de Graduación "Diseño de Mezcla Densa en Frio"
 Procedencia: La Cantera SA de CV
 Ubicación: San Diego, La Libertad

Material: Combinado
 Laboratorista: G.T.G

Fecha de ensayo: 11-May-10

Peso inicial sin lavar: **5301** g
 Peso inicial lavado: **5246** g

Material fino por lavado: **55** g

MALLA	PESO		% RETENIDO		% ACUMULADO QUE PASA
	RETENIDO (g)	RETENIDO AJUSTADO	PARCIAL	ACUMULADO	
3/4"	24.1	24.1	0.45	0.45	99.55
3/8"	1232	1232	23.24	23.70	76.30
No.4	1381.6	1381.6	26.06	49.76	50.24
No.8	726.1	726.1	13.70	63.46	36.54
No.50	1489.8	1489.8	28.10	91.56	8.44
No.200	289.6	289.6	5.46	97.02	2.98
Pasa No. 200	100.8	157.8	2.98	100.00	0.00
Σ	5244	5301	100		

ANEXO 8 Análisis combinado de agregado pétreo utilizando banda de especificación del SIECA.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 LABORATORIO DE EMPRESA DISEÑADORA DE MEZCLAS ASFALTICAS ASFALCA S.A



ENSAYO GRANULOMETRICO COMBINADO ASTM C 136

Solicitante: Universidad de El Salvador.

Proyecto: Trabajo de graduación "Diseño de Mezcla en Frio"

Procedencia: La Cantera

Ubicación: San Diego, La Libertad

MALLA		arena triturada	Grava 3/4"	Porcentaje que pasa Combinado teórico	Porcentaje combinado real	Especificaciones Huso MD - 1	
Número	mm					Min	Max
		52.00%	48.00%			100.00%	
1"	25	100%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
3/4"	19.00	100%	99.2%	99.6%	99.55	95.0%	100.0%
3/8"	9.50	100%	35.1%	68.8%	76.30	60.0%	80.0%
Nº 4	4.76	95.6%	1.5%	50.4%	50.24	35.0%	65.0%
Nº 8	2.36	69.5%	0.5%	36.4%	36.54	20.0%	50.0%
Nº 50	0.30	12.5%	0.3%	6.7%	8.44	3.0%	20.0%
Nº 200	0.075	2.4%	0.3%	1.4%	2.98	2.0%	8.0%

NOTA:

GRAVAS:	49.6%	%
ARENAS:	49.0%	%
FINOS:	1.4%	%
SUMA	100.0%	%

ANEXO 9

CUADRO 4.9 RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS A LOS CUALES SE SOMETIERON LOS AGREGADOS PÉTREOS.

RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS A LOS AGREGADOS PETREOS.													
MUESTRA	GRANULOMETRIA (% QUE PASA)								RESISTENCIA A LA DEGRADACION POR ABRACION	ESTABILIDAD DE LOS AGREGADOS ANTE LA ACCION DEL SULFATO DE SODIO O MAGNESIO	GRAVEDAD ESPECÍFICA	ABSORCION	EQUIVALENTE DE ARENA
	1"	3/4"	3/8"	#4	#8	#100	#200						
ARENA				85.49	64.1	13.03	6.37	-----	1.3	2551	1.524%	87.40%	
GRAVA	100	99.17	35.08	1.4	0.45	0.33	0.25	15.10%	-----	2575	1.172%	----	
COMBINADO	100	99.55	76.3	50.2	36.5	8.44	2.98	-----	-----	2562	-----	-----	

FUENTE: Presentación propia de los autores

ANEXO 10

Cuadros Resumen Cálculos de Propiedades Volumétricas y Mecánicas de la Mezcla.
(Contenido de Asfalto Residual de 2.76).

ASFALTO			MEZCLADO Y COMPACTACION			
	TIPO Y GRADO	css-1h	FECHA DE COMPACTACION		julio72010	
	% ASFALTO EN LA EMULSION	59.37	AGUA TOTAL DE LA MEZCLA %		7	
A	ASFALTO RESIDUAL EN LA MEZCLA	2.76	AGUA TOTAL DE LA MEZCLA %		3.70	
B	PESO ESPECIFICO DE ASFALTO	1020	AGUA EN LA COMPACTACION %		6	
			AGREGADO			
			FUENTE: CANTERA SAN DIEGO			
			C	Gsb	2562	
DATOS DE LA BRIQUETA COMPACTADA						
			SECA		SATURADA AL VACIO	
			1	2	3	4
DENSIDAD DE LA BRIQUETA (BULK)						
D	PESO EN AIRE (g)		1028	1029.8		
E	PESO EN EL AGUA (g)		575.3	570.1		
F	PESO S.S.S. (g)		1034.3	1032.9		
G	DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADA (kg/m3)		2240	2225		
Gd	DENSIDAD SECA DE LA MEZCLA COMPACTADA (kg/m3)		2229.6	2208.9		
	ESPEORES (mm)		62	62	62.5	62
ESTABILIDAD MARSHALL						
	ESTABILIDAD LEIDA		94.00	95.00	93.00	92.00
L	ESTABILIDAD (lb)= $E = -84.7057 + 33.05Lc + 0.0036Lc^2$		3053.8	3087.5	3020.1	2986.4
	ESTABILIDAD CORREGIDA					
O	PERDIDA DE ESTABILIDAD (%)		1.8			
	FLUJO, 1/100 in		9.5	9	10.9	12
CONTENIDO DE HUMEDAD						
H	PESO DE BRIQUETA FALLADA		1032.2	1031.4	1032.8	1025.6
I	PESO DE BRIQUETA SECADA EN HORNO (g)		1021.3	1020.8	1006.2	1004.8
K	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		0.46	0.75	2.72	2.13
M	HUMEDAD ABSORBIDA (%)		1.8			
N	VACIOS TOTALES (%)		9.5	10.3		

ANEXO 10.1

(Contenido de Asfalto Residual de 3.76).

ASFALTO			MEZCLADO Y COMPACTACION			
	TIPO Y GRADO	css-1h	FECHA DE COMPACTACION		Jul-10	
	% ASFALTO EN LA EMULSION	59.37	AGUA TOTAL DE LA MEZCLA %		7	
A	ASFALTO RESIDUAL EN LA MEZCLA	3.76	AGUA TOTAL DE LA MEZCLA %		3.009	
B	PESO ESPECIFICO DE ASFALTO	1020	AGUA EN LA COMPACTACION %		6	
			AGREGADO			
			FUENTE: CANTERA SAN DIEGO			
			C	Gsb	2562	
DATOS DE LA BRIQUETA COMPACTADA						
			SECA		SATURADA AL VACIO	
			1	2	3	4
DENSIDAD DE LA BRIQUETA (BULK)						
D	PESO EN AIRE (g)	1046.3	1045.2			
E	PESO EN EL AGUA (g)	588.1	587.1			
F	PESO S.S.S. (g)	1055.4	1053.3			
G	DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADA (Kg/m3)	2239	2242			
Gd	DENSIDAD SECA DE LA MEZCLA COMPACTADA (Kg/m3)	2223.4	2225.2			
	ESPEORES (mm)	64	64	64	65	
ESTABILIDAD MARSHALL						
ESTABILIDAD LEIDA		72.00	75.00	72.00	71.00	
L	ESTABILIDAD (lb)= $E=-84.7057+33.05Lc+0.0036Lc^2$	2313.6	2414.3	2313.6	2280.0	
	ESTABILIDAD CORREGIDA	2313.6	2414.3	2313.6	2244.9	
O	PERDIDA DE ESTABILIDAD (%)	2.4				
	FLUJO, 1/100 in	11.3	15.3	11.9	11.1	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
H	PESO DE BRIQUETA FALLADA	1053.7	1052.3	1035.4	1041.9	
I	PESO DE BRIQUETA SECADA EN HORNO (g)	1037.3	1036.4	1011	1016.6	
K	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	0.73	0.78	2.50	2.58	
M	HUMEDAD ABSORBIDA (%)	1.8				
N	VACIOS TOTALES (%)	8.5	8.4			

ANEXO 10.2

(Contenido de Asfalto Residual de 4.76).

ASFALTO			MEZCLADO Y COMPACTACION			
	TIPO Y GRADO	css-1h	FECHA DE COMPACTACION		Jul-10	
	% ASFALTO EN LA EMULSION	59.37	AGUA TOTAL DE LA MEZCLA %		7	
A	ASFALTO RESIDUAL EN LA MEZCLA	4.76	AGUA TOTAL DE LA MEZCLA %		2.332	
B	PESO ESPECIFICO DE ASFALTO	1020	AGUA EN LA COMPACTACION %		6	
			AGREGADO			
			FUENTE: CANTERA SAN DIEGO			
			C	Gsb	2562	
DATOS DE LA BRIQUETA COMPACTADA						
			SECA		SATURADA AL VACIO	
			1	2	3	4
DENSIDAD DE LA BRIQUETA (BULK)						
D	PESO EN AIRE (g)		1059.8	1058.3		
E	PESO EN EL AGUA (g)		596.9	598.3		
F	PESO S.S.S. (g)		1069.8	1071.8		
G	DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADA (Kg/m3))		2241	2235		
Gd	DENSIDAD SECA DE LA MEZCLA COMPACTADA (Kg/m3)		2220.9	2215.4		
	ESPESORES (mm)		67	67	66	66
ESTABILIDAD MARSHALL						
	ESTABILIDAD LEIDA		71.00	72.0	69.00	70.00
L	ESTABILIDAD (lb)= $E=-84.7057+33.05Lc+0.0036Lc^2$		2280.0	2313.6	2212.9	2246.4
	ESTABILIDAD CORREGIDA		2177.9	2210.0	2145.8	2178.4
O	PERDIDA DE ESTABILIDAD (%)		1.5			
	FLUJO, 1/100 in		15.1	15	15.5	15.5
CONTENIDO DE HUMEDAD						
H	PESO DE BRIQUETA FALLADA		1067.7	1069.2	1047.2	1048.9
I	PESO DE BRIQUETA SECADA EN HORNO (g)		1048.2	1046.4	1013.2	1016.7
K	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		0.95	0.93	3.52	3.32
M	HUMEDAD ABSORBIDA (%)		2.5			
N	VACIOS TOTALES (%)		7.4	7.6		

ANEXO 10.3

(Contenido de Asfalto Residual de 5.76).

ASFALTO			MEZCLADO Y COMPACTACION			
	TIPO Y GRADO	css-1h	FECHA DE COMPACTACION		Jul-10	
	% ASFALTO EN LA EMULSION	59.37	AGUA TOTAL DE LA MEZCLA %		7	
A	ASFALTO RESIDUAL EN LA MEZCLA	5.76	AGUA TOTAL DE LA MEZCLA %		1.64	
B	PESO ESPECIFICO DE ASFALTO	1020	AGUA EN LA COMPACTACION %		6	
			AGREGADO			
			FUENTE: CANTERA SAN DIEGO			
			C	Gsb	2562	
DATOS DE LA BRIQUETA COMPACTADA						
			SECA		SATURADA AL VACIO	
			1	2	3	4
DENSIDAD DE LA BRIQUETA (BULK)						
D	PESO EN AIRE (g)		1060.4	1063.8		
E	PESO EN EL AGUA (g)		599.1	598.1		
F	PESO S.S.S. (g)		1075.6	1078.4		
G	DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADA (Kg/m3))		2225.4	2214.9		
Gd	DENSIDAD SECA DE LA MEZCLA COMPACTADA (Kg/m3)		2204.5	2194.8		
	ESPESORES (mm)		68	67	67	68
ESTABILIDAD MARSHALL						
	ESTABILIDAD LEIDA		48.00	51.00	47.00	50.00
L	ESTABILIDAD (lb)= $E=-84.7057+33.05Lc+0.0036Lc^2$		1510.0	1610.2	1476.6	1576.8
	ESTABILIDAD CORREGIDA		1421.2	1538.1	1410.5	1484.0
O	PERDIDA DE ESTABILIDAD (%)		1.7			
	FLUJO, 1/1000 in		15	16	15.5	16
CONTENIDO DE HUMEDAD						
H	PESO DE BRIQUETA FALLADA		1080.3	1074.4	1098.7	1088.5
I	PESO DE BRIQUETA SECADA EN HORNO (g)		1055.1	1050.2	1057.4	1050
K	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		1.00	0.97	4.13	3.88
M	HUMEDAD ABSORBIDA (%)		3.0			
N	VACIOS TOTALES (%)		6.9	7.3		

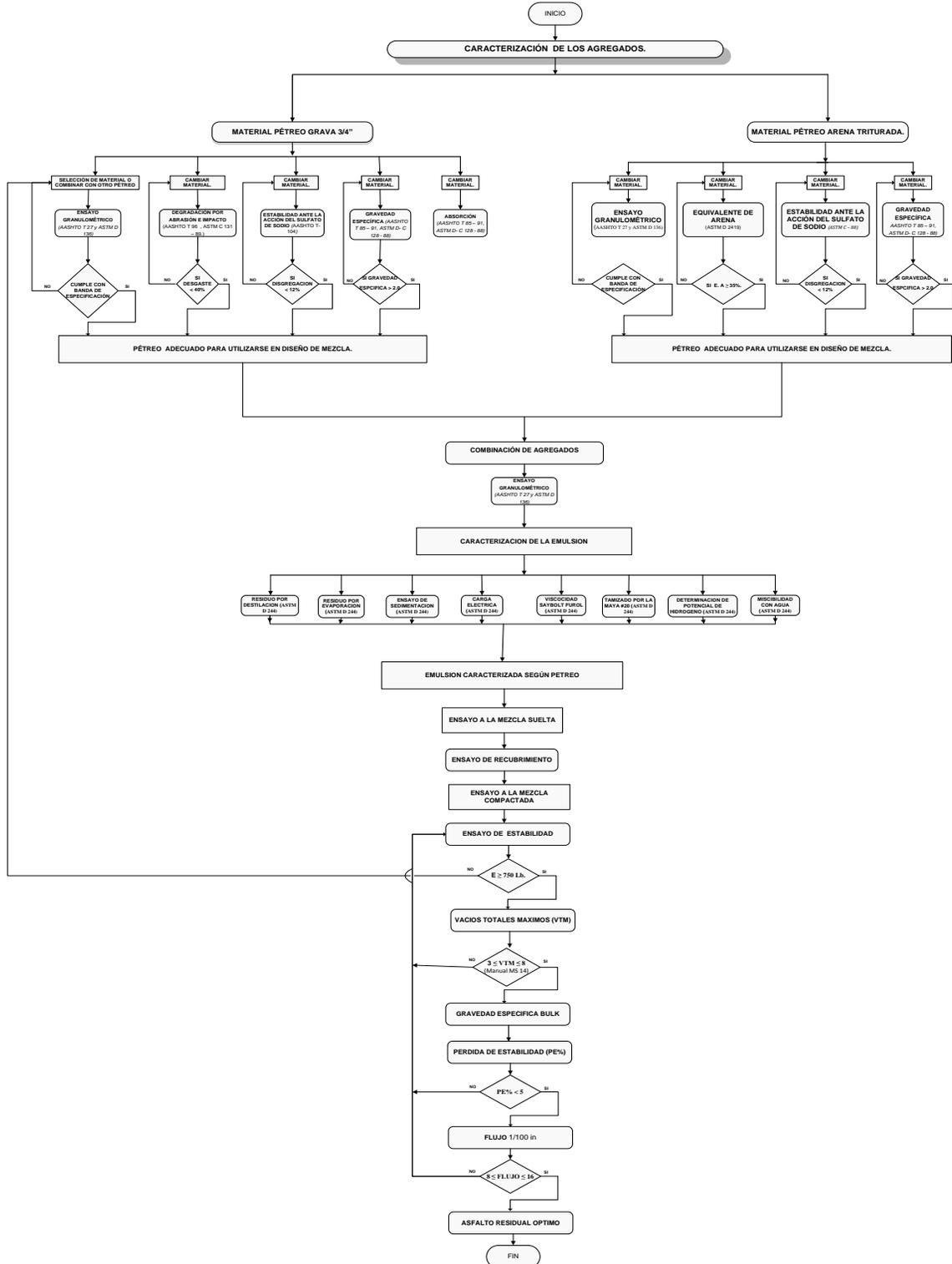
ANEXO 10.4

(Contenido de Asfalto Residual de 6.76).

ASFALTO			MEZCLADO Y COMPACTACION			
	TIPO Y GRADO	css-1h	FECHA DE COMPACTACION		Jul-10	
	% ASFALTO EN LA EMULSION	59.37	AGUA TOTAL DE LA MEZCLA %		7	
A	ASFALTO RESIDUAL EN LA MEZCLA	6.76	AGUA TOTAL DE LA MEZCLA %		0.950	
B	PESO ESPECIFICO DE ASFALTO	1020	AGUA EN LA COMPACTACION %		6	
			AGREGADO			
			FUENTE: CANTERA SAN DIEGO			
			C	Gsb	2562	
DATOS DE LA BRIQUETA COMPACTADA						
			SECA		SATURADA AL VACIO	
			1	2	3	4
DENSIDAD DE LA BRIQUETA (BULK)						
D	PESO EN AIRE (g)		1084.7	1089.1		
E	PESO EN EL AGUA (g)		595.9	609.3		
F	PESO S.S.S. (g)		1104	1110.9		
G	DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADA (Kg/m3)		2135	2171		
Gd	DENSIDAD SECA DE LA MEZCLA COMPACTADA (Kg/m3)		2104.3	2141.6		
	ESPESORES (mm)		68	68	68	67
ESTABILIDAD MARSHALL						
	ESTABILIDAD LEIDA		30.00	29.00	28.00	28.00
L	ESTABILIDAD (lb)= $E=-84.7057+33.05Lc+0.0036Lc^2$		910.0	876.8	843.5	843.5
	ESTABILIDAD CORREGIDA		856.5	825.2	793.9	805.7
O	PERDIDA DE ESTABILIDAD (%)		5.7			
	FLUJO, 1/1000 in		9	12	10.5	11
CONTENIDO DE HUMEDAD						
H	PESO DE BRIQUETA FALLADA		1097.7	1106.7	1102	1104.5
I	PESO DE BRIQUETA SECADA EN HORNO (g)		1063	1070.1	1060	1055
K	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)		1.55	1.48	4.23	5.01
M	HUMEDAD ABSORBIDA (%)		3.1			
N	VACIOS TOTALES (%)		10.0	8.4		

ANEXO 11. Diagrama de Flujo de Pruebas de Laboratorio.

DIAGRAMA DE FLUJO DE PRUEBAS REALIZADAS A LOS AGREGADOS PÉTREOS, EMULSIÓN ASFÁLTICA Y MEZCLA COMPACTADA.



GLOSARIO

Abrasión: Acción y efecto de raspar o desgastar por fricción una superficie

Ahuellamiento: Son las depresiones longitudinales continuas a lo largo de las huellas de canalización del tránsito.

Anisotrópico: (opuesto de isotropía), Es la propiedad general de la materia según la cual determinadas propiedades físicas, tales como: elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc. varían según la dirección en que son examinadas. Algo *anisótropo* podrá presentar diferentes características según la dirección.

Arcilla esquistosa: (*alemán: Schieferton*) La arcilla esquistosa es una roca arcillosa con textura de planchas finas, que se remite a la regulación de los minerales arcillosos formados como láminas o agujas.

Asfáltenos: Los asfáltenos son una familia de compuestos químicos orgánicos, resultan de la destilación fraccionada del petróleo crudo y representan los compuestos más pesados y por tanto, los de mayor punto de ebullición.

Asfalto Efectivo: Es la concentración de masa del ligante asfáltico no absorbido en una mezcla asfáltica.

Asfalto: Material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Estos pueden tener dos orígenes; los derivados de petróleos y los naturales.

Banda de especificación: Huso granulométrico.

Briqueta: Especímen de prueba estándar de 64 mm (2 ½") de alto y 102 mm (4") de diámetro usado en el método Marshall Modificado.

Cántabro: Método para mezclas abiertas y semi abiertas.

Carpeta de rodadura: Es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir.

Cemento asfáltico: Asfalto clasificado de acuerdo a ciertos criterios establecidos para Mezclas en caliente y otros usos.

Coloide: Suspensión de partículas diminutas de una sustancia, llamada fase dispersada, en otra fase, llamada fase continua, o medio de dispersión.

Degradación: Disminución de tamaño de algunos agregados.

Demulsibilidad: Pérdida de la interface de una emulsión, seguida de una ganancia en la capacidad de coagulación (capacidad de sedimentarse) de los glóbulos de asfalto que la constituyen.

Denudación: Desprendimiento de partículas.

Deyección: Conjunto de materias arrojadas o desprendidas.

Emulgente: Emulsionante.

Emulsificante: Es un compuesto que ayuda a que otro compuesto no polar como las grasas y uno polar como el agua formen una mezcla estable llamada emulsión, como la mayonesa, es una emulsión ya que es una mezcla de aceite y agua, con yema de huevo que es grasa y no se separa gracias a los emulsificantes que le añaden.

Emulsión aniónica: Es un tipo de emulsión en donde el agente emulsificante le confiere una polaridad negativa a los glóbulos de asfalto, o sea que están cargados electro negativamente.

Emulsión asfáltica: Mezcla de asfalto con emulsificantes que con el agua forman una emulsión estable que permite tender las carpetas asfálticas "en frío", es decir, a temperatura ambiente.

Emulsión catiónica: Es un tipo de emulsión en el que el agente emulsificante le confiere una polaridad positiva a los glóbulos de asfalto, o sea que están cargados electro positivamente.

Emulsión: Una emulsión es una dispersión coloidal de partículas líquidas en otro líquido; es una 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); la mayonesa, por ejemplo, es una suspensión de glóbulos diminutos de aceite en agua.

Emulsionante: Un emulsionante (también llamado como emulgente) es una sustancia que estabiliza una emulsión, frecuentemente un surfactante. Ejemplos de alimentos emulsionantes están la yema de huevo (en donde el principal químico emulsionante es la lecitina),

Gálibos: El término gálibo se utiliza para hacer referencia a la zona geométrica que debe estar libre de obstáculos alrededor de un sitio.

Gradación: Disposición o ejecución de algo en grados sucesivos, ascendentes o descendentes.

Heptano: El heptano es un hidrocarburo saturado lineal de la familia de los alcanos de fórmula C_7H_{16} , existe en la forma de 9 isómeros.

Hidrofílico: Es el comportamiento de toda molécula que tiene afinidad por el agua. En una disolución o coloide, las partículas hidrófilas tienden a acercarse y mantener contacto con el agua.

Hidrofobicidad: Repelencia al agua.

Hidrofóbico: En el contexto fisicoquímico, el término se aplica a aquellas sustancias que son repelidas por el agua o que no se pueden mezclar con ella. Un ejemplo de sustancias hidrófobas son los aceites.

Hubbard field: Método para mezclas de arena asfálticas.

Huso granulométrico: Banda de especificación granulométrica.

Inmiscible: Se aplica a la sustancia que no puede ser mezclada con otra, como el aceite con el agua.

Máltenos: Los máltenos son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición, están constituidos por anillos aromáticos, nafténicos y con muy pocas cadenas parafínicas.

Método Hveem: (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial.

Método Marshall (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.

Mezcla asfáltica en caliente: Se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante (requiere que los materiales se calienten entre 135° a 180° C)

Mezcla asfáltica en frío: Son las mezclas fabricadas con emulsiones asfálticas, y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación

de carreteras secundarias (Todo el proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente).

Mezcla asfáltica: Es una combinación de cemento asfáltico y agregado pétreo en proporciones exactas y previamente especificadas (se pueden fabricar en caliente o en frío).

Microsurfacing: Es un micropavimento en el cual se combinan las características de la lechada asfáltica con las bondades del asfalto modificado con polímeros.

Tiene un bajo contenido de asfalto y puede ser aplicado en un mayor espesor o en varias capas permitiendo corregir serias deformaciones, ahuellamiento y pequeños baches de hasta 40 mm, En éste la mezcla desarrolla cohesión interna rápidamente y por ello el tiempo de apertura al tráfico normalmente podría ser en una hora.

Miscible: Miscibilidad es un término usado en química que se refiere a la propiedad de algunos líquidos para mezclarse en cualquier proporción, formando una solución homogénea.

Molino coloidal: Son equipos que se utilizan generalmente para fabricar emulsiones.

Pétreo: Los materiales pétreos (del latín *Petreus*; Pedregoso) son las piedras naturales, pueden presentarse en forma de bloques, losetas, gránulos. Ej. pizarra, mármol o la arena.

Polímero: Los polímeros son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

Reología: Es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir.

Rompimiento de una emulsión: Es la formación de películas delgadas de asfalto sobre los agregados de la mezcla, a causa de la demulsibilidad en la emulsión asfáltica, a la cual este pertenece.

Slurry seal: (mortero asfáltico= Arena + Emulsión Asfáltica) Es una mezcla de agregado fino bien graduado, relleno mineral (filler), emulsión asfáltica (de rompimiento lento “SS” o acelerado “QS”) y agua, que adquiere un aspecto “cremoso”.

Surfactante: Sustancia que reduce la tensión superficial de un líquido, y que sirve como agente humectante o detergente.

Termoplástico: Son polímeros que pueden deformarse por acción de la temperatura, y fundirse si se eleva ésta suficientemente.

Vacios en el Agregado Mineral (VMA): Son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada incluyendo los espacios que están llenos con asfalto.

Viscoelástico: La viscoelasticidad es un tipo de comportamiento reológico que presentan ciertos materiales que exhiben tanto propiedades viscosas como propiedades elásticas cuando se deforman.