

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**



**“EVALUACIÓN DE LA MACROTEXTURA EN PAVIMENTOS FLEXIBLES,
CONSTRUIDOS CON MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS, DISEÑADAS POR EL
MÉTODO MARSHALL”**

PARA OPTAR AL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

**JUAN CARLOS GONZÁLEZ CERRITOS
MARÍA ELENA ORANTES HERNÁNDEZ
NAHUM RIGOBERTO HERNÁNDEZ MIXCO**

DOCENTE ASESOR:

ING. MAX ADALBERTO HERNÁNDEZ RIVERA

SEPTIEMBRE DE 2014

SANTA ANA EL SALVADOR CENTRO AMERICA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

INGENIERO MARIO ROBERTO NIETO LOVO

VICERRECTORA ACADEMICA:

Licda. Ms. ANA MARÍA GLOWER DE ALVARADO

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO:

MAESTRO OSCAR NOÉ NAVARRETE

SECRETARIA GENERAL:

DOCTORA ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FISCAL GENERAL

LICENCIADO FRANCISCO CRUZ LETONA

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE

DECANO:

LICENCIADO RAÚL ERNESTO AZCUNAGA LÓPEZ

VICEDECANO:

INGENIERO WILLIAM VIRGILIO ZAMORA GIRÓN

SECRETARIO:

LICENCIADO VICTOR HUGO MERINO QUEZADA

JEFA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA:

ING. Ms. SORAYA LISSETTE BARRERA DE GARCÍA

DOCENTE ASESOR:

INGENIERO MAX ADALBERTO HERNÁNDEZ RIVERA

SANTA ANA, SEPTIEMBRE DE 2014

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

ING. MAX ADALBERTO HERNÁNDEZ RIVERA

DOCENTE ASESOR

SANTA ANA, SEPTIEMBRE DE 2014

TRIBUNAL CALIFICADOR DEL PROCESO DE GRADO:

ING. MAX ADALBERTO HERNÁNDEZ RIVERA

DOCENTE ASESOR

ING. MARTA RAQUEL QUEVEDO

ING. SALVADOR ELISEO MELÉNDEZ

SANTA ANA, SEPTIEMBRE DE 2014

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por habernos dado la fortaleza, iluminación en nuestros caminos para cumplir con las metas trazadas y culminar nuestra carrera.

A la empresa **DISA S.A de C.V.** que nos brindo todo el apoyo a lo largo de nuestra investigación brindando el equipo de laboratorio y material utilizado para desarrollar nuestra tesis.

Al **Ing. Luis Antonio López Lemus** asesor de nuestra investigación que nos proporciono todo su conocimiento y apoyo técnico.

Al personal de la planta asfáltica **DISA S.A de C.V** Quezaltepeque:

Tec. Ricardo Méndez

Tec. Carmen Ramos

Henry Adalid Pérez y Nelson Ramos

Que colaboraron a lo largo del desarrollo de la investigación.

A nuestro Docente Director **Ing. Max Adalberto Hernández Rivera**, que con su valiosa colaboración, enriqueció el contenido de esta tesis.

En general a todas las personas que contribuyeron de forma directa o indirecta la elaboración del presente trabajo de graduación.

DEDICATORIA

A **DIOS:** por darme sabiduría en transcurso de mi camino, para él sea la honra y la gloria.

A MI MADRE: Juana Cerritos, por apoyarme en todo momento, darme ánimos y bendecirme cada día, por creer en las capacidades que Dios me dio y ser un apoyo incondicional en mi vida y alguien fundamental para que lograra este triunfo.

A MI HERMANO: Salvador Antonio González Cerritos que estuvo siempre ayudándome incondicionalmente y motivándome para salir adelante.

A MI HERMANA: Yuri Lissette González Cerritos Por la confianza, ánimos, valores y estar siempre conmigo cuando más la necesite, esforzándose por comprarme todo lo que necesite para esta investigación.

A MI NOVIA: Elsa Esperanza Lucha Ramírez que estuvo en todo momento apoyándome sacrificando su tiempo, su apoyo fue muy importante para el grupo completo de esta investigación ya que con sus aportes y conocimiento nos permitió desarrollar y dar forma a la presente investigación

Juan Carlos González Cerritos

DEDICATORIA

Al que permitió que todo saliera bien en los momentos difíciles y de debilidad en esta etapa de universidad, cuando parecía que el camino no tenía fin él siempre estaba conmigo y nunca me dejó sola, siempre ha sido fiel, gracias infinitas al **Dios** todo poderoso por estar todos los días en mi vida, por darme esta oportunidad de terminar este trabajo de grado, y por dejarme saber que fue su ayuda divina la que hizo realidad este sueño tan anhelado. Gracias nunca podré pagarte tanto amor y fidelidad, a ti sea la gloria y el honor, por los siglos de los siglos.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento a mis padres, Dina Yolanda y Eleodoro Orantes: por ayudarme no solo en lo económico, sino por comprenderme y darme el apoyo moral y emocional que necesité en los momentos de dificultad, cuando me enfermaba, cuando me faltaban los ánimos para ir a estudiar, cuando tenía problemas con alguna materia; por aconsejarme y estar siempre conmigo gracias no tengo como pagarles.

También gracias a mis hermanas, hermano, sobrinas, y sobrinos por apoyarme incondicionalmente.

De igual manera a mis pastores y jefes que me brindaron el tiempo necesario para que estudiara.

Gracias al **Ing. Luis López**, por creer en mis compañeros de tesis y en mi por habernos brindado la oportunidad de desarrollar nuestra tesis en la los laboratorios de **DISA, SA de CV**.

Al **Ing. Max Adalberto Hernández**, por ser el director de tesis

Mis compañeros y compañeras de trabajo por cubrir algunas horas por mí.

Son muchas las personas amigos, amigas, compañeros de trabajo que ayudaron de una u otra manera en la formación de mi vida profesional, a todas ellas también gracias por sus consejos, apoyo y ánimos y compañía en los momentos difíciles.

María Elena Orantes Hernández

DEDICATORIA

A **Dios** por darme fuerza e iluminar mi camino y permitir culminar mi carrera.

A MIS PADRES: Jesús Rigoberto y Vilma Elizabeth, por estar conmigo en todo momento, darme ánimos por creer en mí y ser mi principal apoyo son el pilar fundamental de este triunfo.

A MIS HERMANOS: Henry y su esposa Beatriz que estuvieron siempre ayudándome incondicionalmente y creer en mí, Herson y su esposa Jaimie que siempre me ayudaron y me motivaron a salir adelante.

A MI TIA ESTELA: Mi segunda madre, por la confianza, ánimos, valores y estar siempre conmigo cuando lo necesito.

A MIS SOBRINOS: Henry Jaiden y Fernando Javier

A MIS FAMILIARES Y AMIGOS que siempre me ayudaron y me dieron todo su apoyo.

Nahum Rigoberto Hernández Mixco

CONTENIDO

INDICE GENERAL.....	i
INDICE DE FIGURAS.....	vii
INDICE DE TABLAS.....	x
SIGLAS.....	xiii
INTRODUCCION.....	xv

CAPITULO I

GENERALIDADES DE LA INVESTIGACION

1. GENERALIDADES	1
1.1.ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	1
1.1.1.Red vial en El Salvador	1
1.1.2.El asfalto.....	4
1.1.3.El método Marshall	5
1.1.4.Macrotextura.....	6
1.2.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
1.3.OBJETIVOS	8
1.3.1.Objetivo General.....	8
1.3.2.Objetivo Específicos	8
1.4.ALCANCES	9
1.5.LIMITACIONES	10
1.6.JUSTIFICACION.....	11

CAPITULO II

MARCO REFERENCIAL Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2. MARCO REFERENCIAL Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES	13
2.1.VÍAS PAVIMENTADAS Y NO PAVIMENTADAS DE EL SALVADOR	13
2.2.MATERIALES PÉTREOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO.....	14
2.2.2.Clasificación de los agregados pétreos.....	16

2.2.3.Propiedades de los agregados pétreos	17
2.2.4.Pruebas realizadas a los agregados para el diseño	19
2.3.DEFINICIÓN DE PAVIMENTO	20
2.4.TIPOS DE PAVIMENTO	21
2.4.1.Pavimento Rígido	21
2.4.2.Pavimento Flexible	21
2.5.CONCEPTOS BÁSICOS DE ASFALTO	23
2.5.1.Definición de asfalto	23
2.5.2.Propiedades físicas del asfalto	24
2.5.3.Propiedades químicas del asfalto	30
2.6.SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.....	33
2.6.1.Sistema de clasificación por penetración.....	34
2.6.2.Sistema de clasificación por viscosidad.....	35
2.7.CONCEPTOS BÁSICOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	37
2.7.1.Definición de mezcla asfáltica	37
2.7.2.Clasificación de las mezclas asfálticas	38
2.7.2.1.Por fracciones de agregado pétreo empleado	38
2.7.2.2.Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica	39
2.7.2.3.Por el tamaño máximo del agregado pétreo.....	39
2.7.2.4.Por la estructura del agregado pétreo	39
2.7.2.5.Por Granulometría	40
2.7.3.Tipología de las mezclas asfálticas	41
2.7.3.1.Mezcla asfáltica en caliente	41
2.7.3.2.Mezcla asfáltica en frio	42
2.7.3.3.Mezcla porosa o Drenante.....	43
2.7.3.4.Microaglomerados	43

CAPITULO III
DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA

3. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	44
3.1.DEFINICIÓN	44
3.2.EVOLUCION DE LOS DISEÑOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	45
3.3.CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA ASFALTICA.....	46
3.3.1.Densidad	47
3.3.2.Vacíos de aire	47
3.3.3.Vacíos en el agregado mineral VMA	48
3.3.4.Contenido de asfalto.....	49
3.3.5.Vacíos llenos de asfalto VFA.....	51
3.4.PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFALTICA	51
3.4.1.Estabilidad.....	51
3.4.2.Durabilidad	54
3.4.3.Flexibilidad	55
3.4.4.Resistencia a la fatiga	56
3.4.5.Resistencia al deslizamiento	58
3.4.6.Impermeabilidad.....	59
3.4.7.Trabajabilidad.....	59
3.5. MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL	60
3.5.1.Metodología.....	60
3.5.2.Propósito de la metodología	60
3.5.3.Descripción general.....	60
3.5.4.Especificaciones de la metodología	61
3.5.5.Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño	64
3.5.6.Ensayos a la mezcla compactada	69
3.6.DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS.....	71
3.6.1.Dosificación	71

3.6.2.Método Analítico.....	72
3.7.PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE UTILIZANDO EL MÉTODO MARSHALL.....	81
3.7.1.Procedimiento para la combinación de agregados a utilizar en la mezcla asfáltica.	83
3.7.2.Dosificación de agregados para la mezcla	88
3.7.3.Estimación del porcentaje optimo de asfalto	90
3.7.4.Procedimiento para calcular la dosificación de agregado y asfalto para la mezcla.....	93
3.8.TRABAJO DE LABORATORIO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA.....	97
3.8.1.Gravedad específica BULK (AASHTO T 166-00).....	105
3.8.2.Gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209 -05).....	109
3.8.3.Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el equipo Marshall, AASHTO T-245-97.....	112
3.9.ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO.	120
3.9.1.Análisis de la Densidad.	120
3.9.2.Análisis de vacíos de aire.....	121
3.9.3.Análisis de vacíos en el agregado mineral.	122
3.9.4.Análisis de vacíos llenos de asfalto VFA.	124
3.10.GRÁFICOS DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	125
3.10.1.Observaciones y tendencias de las gráficas de diseño.	126
3.11.DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO.....	130
3.12.PUNTO DE COMPROBACIÓN.	133
3.12.1.Extracción cuantitativa de asfalto en mezclas de pavimento bituminoso (ASTM D 2172-05)	135
3.12.2.ANALISIS MECÁNICO DE AGREGADO EXTRAIDO	138
3.13.ENSAYO DE EFECTO DE HUMEDAD EN MEZCLAS DE CONCRETO ASFALTICO PARA PAVIMENTOS ASTM D 4867	140

CAPITULO IV
EVALUACIÓN DE LA MACROTEXTURA

EVALUACIÓN DE LA MACROTEXTURA	142
4.1.TEXTURA.....	142
4.1.1.Definiciones de Textura.....	143
4.2.TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DE LA MACROTEXTURA	151
4.2.1.Técnicas Volumétricas	152
4.2.2.Técnicas Perfilométricas	153
4.3.EVALUACION DE LA MACROTEXTURA CON EL TIEMPO	154
4.4.HIDROPLANEÓ Ó AQUIPLANING	155
4.4.1.Presencia de agua en el pavimento	157
4.5.CALCULO TEÓRICO DE LA MACROTEXTURA (NCHRP ₁₀₈) 159_Toc396949040	
4.5.1.NCHRP Informe 441 (Stroup-Gardiner y Brown, 2000).....	159
4.5.2.MPD en el Virginia Intelligent Road-(Metodo de Davis, 2001)	160
4.6.DETERMINACIÓN DE LA MACROTEXTURA TEÓRICA	161
4.6.1.Método NCHRP Informe 441 (Stroup-Gardiner y Brown, 2000).....	163
4.6.2.Método de Davis MPD en el Virginia inteligente Road	165
4.7. EVALUACIÓN DE LA MACROTEXTURA POR MEDIO DEL MÉTODO DEL CÍRCULO DE ARENA	166
4.7.1.Descripción del método del círculo de arena.....	166
4.7.2.Procedimiento	168
4.7.3.Equipo	169
4.7.4.Calculo	171
4.8.EVALUACIÓN DE LA MACROTEXTURA EN CAMPO DE LA MEZCLA DENSE DISEÑADA CON TMN $\frac{3}{4}$ "	174

CAPITULO V

ANÁLISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

5.ANÁLISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS	184
5.1.ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS A LOS AGREGADOS PETREOS	185
5.1.1.Análisis granulométrico	185
5.1.2.Análisis de resultados de ensayo gravedad específica y absorción del agregao grueso (AASHTO T 85–91)	190
5.1.3.Análisis de ensayo equivalente de arena (ASTM D-2419)	192
5.1.4.Análisis de propiedades volumétricas y mecánicas de la mezcla asfáltica	193
5.1.5.RESULTADOS DEL DISEÑO MARSHALL	197
5.2.ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA MACROTEXTURA EN CAMPO	199
5.3.ANÁLISIS ENTRE LA MACROTEXTURA DEL PROCESO DE LABORATORIO Y LA OBTENIDA EN CAMPO.....	200

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	204
CONCLUSIONES.....	204
RECOMENDACIONES.....	206
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	207
REFERENCIAS CONSULTADAS.....	209
ANEXOS.....	210

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Red vial primaria no pavimentada.....	13
Figura 2.2	Explotacion de los agregados.....	16
Figura 2.3	Componentes de una carpeta asfáltica	23
Figura 2.4	Propiedades del asfalto Adhesión y Cohesión expuestas al agua	25
Figura 2.5	Influencia de la temperatura en los ligantes asfálticos.....	29
Figura 2.6	Composición del asfalto	32
Figura 2.7	Composición del asfalto	33
Figura 3.1	Diagrama de componentes de una mezcla asfáltica HMA.....	50
Figura 3.2	Ahuellamiento en un pavimento.....	52
Figura 3.3	Corrimiento de asfalto en un pavimento.....	53
Figura 3.4	Exudacion o Afloramiento de asfalto.....	54
Figura 3.5	Grafico curvas fuller de máxima densidad basadas en un gráfico normalizado Semi-log de Granulometría.	65
Figura 3.6	Grafico curvas de densidad máxima basadas en un gráfico FHWA (potencia de 0.45) de granulometría	66
Figura 3.7	Grafico curva granulométrica. agregado grueso y fino para 2 agregados	74
Figura 3.8	Grafica de la especificación y la media	75
Figura 3.9	Grafica de especificación, promedio y mezcla para 2 agregados	76
Figura 3.10	Curva granulométrica agregado Grueso, Medio y Fino para 3 agregados.....	78
Figura 3.11	Grafica de especificación, promedio y mezcla para 3 agregados	80
Figura 3.12	Grafico de comprobación granulométrica de la combinación de los tres agregados con su banda de control.....	87
Figura 3.13	Material secado y pesado de cada una de las proporciones de agregado.....	97
Figura 3.14	Calentamiento previo de agregados y asfalto	98
Figura 3.15	Cabaleo de pesos	98
Figura 3.16	Mezclado de agregado y asfalto	99

Figura 3.17 Cuarteo de la mezcla asfáltica	100
Figura 3.18 Calentado de equipo de compactación	100
Figura 3.19 Colocación de la mezcla en el molde de compactación y compactación manual de la mezcla.....	102
Figura 3.20 Verificación de temperatura de compactación	102
Figura 3.21 Curado de briquetas	103
Figura 3.22 Peso seco de Briqueta.....	105
Figura 3.23 Peso sumergido de Briqueta	106
Figura 3.24 Peso superficialmente seco de cada Briqueta	106
Figura 3.25 Picnómetro Teórica Máxima	110
Figura 3.26 Equipo teórica máxima	110
Figura3.27 Equipo de vacío, vibrado, picnómetro y manómetro ensamblado.....	111
Figura 3.28 Colocación en maquina de ensayo de ensamble briqueta	113
Figura 3.29 Colocación del medidor de flujo- aplicación de la carga a las briquetas	114
Figura 3.30 Gráfico Porcentaje de vacíos - Contenido de asfalto	127
Figura 3.31 Gráfico %VMA - Contenido de asfalto	127
Figura 3.32 Gráfico %VFA - Contenido de asfalto	128
Figura 3.33 Gráfico Densidad - Contenido de asfalto	128
Figura 3.34 Gráfico Flujo - Contenido de asfalto.....	129
Figura 3.35 Gráfico estabilidad - Contenido de asfalto.	129
Figura 3.36 Mezcla siendo vertida en el tazón	136
Figura 3.37 Mezcla siendo pesada para el ensayo de extraccion de asfalto	136
Figura 3.38 Mezcla siendo vertida en el tazón de la maquina centrífuga.....	137
Figura 3.39 Mezcla siendo vertida en el bowl para extraccion de asfalto	138
Figura 3.40 Grafico de granulometría a agregado extraído	139
Figura 4.1 Clasificación del perfil según PIARC.....	143
Figura 4.2 Partículas de agregado que sobresalen en el pavimento.....	144
Figura 4.3 Clasificación de la Textura según AIPCR	147

Figura 4.4 Ejemplo de Macrotextura de un pavimento.....	148
Figura 4.5 Tipo de textura de un pavimento.....	151
Figura 4.6 Definición de la profundidad media de perfil	153
Figura 4.7 Principio de la medición de la profundidad de la textura con dispositivo laser	154
Figura 4.8 Efecto de la película de agua sobre el contacto neumático	156
Figura 4.9 Contacto entre neumático y pavimento mojado	158
Figura 4.10 Gráfico granulometría combinada del diseño de mezcla TMN $\frac{3}{4}$ ".....	163
Figura 4.11 Equipo y Material utilizar según el método del círculo de arena	167
Figura 4.12 Recipiente cilíndrico para ensayo de la mancha de arena.....	175
Figura 4.13 Selección, inspección y limpieza de tramo a estudiar.....	176
Figura 4.14 Colocación del material en el recipiente	176
Figura 4.15 Colocación del material en la superficie del pavimento y generación de la mancha de arena	177
Figura 4.16 Mancha de arena generada	177
Figura 4.17 Medición y registro del diámetro promedio	178
Figura 4.18 Tramo # 1 en Estudio.....	178
Figura 4.19 Proceso de tomas de lecturas.....	179
Figura 4.20 Tramo # 2	181
Figura 4.21 Tramo # 3	182
Figura 5.1 Grafico de granulometria combinada	190
Figura 5.2 Proceso de colocacion de mezcla asfaltica.....	203

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Red vial nacional prioritaria pavimentada y no pavimentada.....	13
Tabla 2.2 Requisitos para clasificar el asfalto segun ASTM D 946-8.....	35
Tabla 2.3 Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381	36
Tabla 2.4 Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381- residuo asfaltico	37
Tabla 2.5 Clasificaciones de las mezclas asfálticas	41
Tabla 3.1 Causas y efectos de la poca durabilidad	55
Tabla 3.2 Causas y efectos de mezcla demasiado permeable	59
Tabla 3.3 Graduaciones propuestas para mezclas cerrada	62
Tabla 3.4 Criterios para el diseño de Mezclas por el Método Marshall	63
Tabla 3.5 Porcentaje mínimo de VMA	64
Tabla 3.6 Especificaciones y granulometría de los dos agregados a ser combinados.....	73
Tabla 3.7 Especificaciones y granulometría de los tres agregados a ser combinados.....	75
Tabla 3.8 Especificaciones de los tres agregados a ser combinados	76
Tabla 3.9 Resultados de la combinación de los tres agregados	80
Tabla 3.10 Granulometría combinada de los agregados a utilizar en la mezcla	85
Tabla 3.11 Especificación la banda de control de la granulometría tipo - C de la SIECA.....	86
Tabla 3.12 Tabla con datos de la banda C especificados	87
Tabla 3.13 Porcentajes calculados para cada fracción de agregados a utilizar en la mezcla	89
Tabla 3.14 Factores "c" y "K" para calculo de contenido de asfalto	90
Tabla 3.15 Variación del coeficiente "n" según el tipo de material	91
Tabla 3.16 Cantidad de material por tipo de agregado.....	95
Tabla 3.17 Resumen con los datos calculados para cada punto a evaluar.....	96

Tabla 3.18 Resumen del cálculo de la gravedad específica Bulk	107
Tabla 3.19 Resumen del cálculo de la gravedad teórica máxima.....	111
Tabla 3.20 Resumen del cálculo de Estabilidad y Flujo.	115
Tabla 3.21 Resumen gravedad específica Bulk, teórica máxima y porcentaje de vacíos	121
Tabla 3.22 Resumen para el cálculo de vacíos en el agregado mineral (VMA).....	123
Tabla 3.23 Resumen para el cálculo del porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA).	124
Tabla 3.24 Resumen para el trazado de los gráficos del Método Marshall	125
Tabla 3.25 Cuadro resumen diseño de mezcla asfáltica, para agregado con tamaño máximo de 3/4"	132
Tabla 3.26 Cuadro resumen diseño ensayos al punto de comprobación.	135
Tabla 3.27 Resumen de ensayo de granulometría a agregado extraído.....	139
Tabla 3.28 Resumen de ensayo efecto de humedad en mezclas de concreto asfáltico.....	141
Tabla 4.1 Granulometría combinada del diseño de la mezcla asfáltica de TMN ¾" 84.....	162
Tabla 4.2 Hoja de informe de la evaluación de la profundidad media de la Macrotectura	173
Tabla 4.3 Datos del MTD Tramo 1	179
Tabla 4.4 Datos del MTD Tramo 2	182
Tabla 4.5 Datos del MTD Tramo 3	183
Tabla 5.1 Rangos requeridos de graduacion de agregados petreos	186
Tabla 5.2 Analisis granulometrico grava ¾"	187
Tabla 5.3 Analisis granulometrico grava ½"	188
Tabla 5.4 Analisis granulometrico arena triturada	188
Tabla 5.5 Resumen de ensayo de granulometria combinada	189
Tabla 5.6 Resumen de ensayo de gravedad específica y absorcion de grava ¾" ..	191

Tabla 5.7 Resumen de ensayo de gravedad especifica y absorcion de grava ½"...	191
Tabla 5.8 Resumen de ensayo de equivalente de arena.....	192
Tabla 5.8 Resumen de valores de estabilidad.....	194
Tabla 5.10 Resumen de valores de la densidad bulk.....	195
Tabla 5.11 Resumen de valores de flujo.....	195
Tabla 5.12 Resumen de valores del VFA.....	196
Tabla 5.13 Resumen de valores del VMA.....	196
Tabla 5.14 Resumen de valores de % de vacios.....	197
Tabla 5.15 Resumen de parametros de diseño Marshall.....	198
Tabla 5.16 Comparacion de valores del MTD con lectura promedio Tramo I.....	199
Tabla 5.17 Comparacion de valores del MTD con lectura promedio Tramo II.....	200
Tabla 5.18 Comparacion de valores del MTD con lectura promedio Tramo III.....	200
Tabla 5.19 Cuadro comparativo del MTD con la Macrotextura teorica.....	201
Tabla 5.20 Cuadro comparativo de la Macrotextura por tramo.....	202

SIGLAS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials, (Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte)

AAMAS: Metod Asphalt Aggregate Mixture Analysis System, (Sistema de análisis de mezclas asfálticas)

ASTM: Asociación americana de ensayo de materiales, American Society of Testing Materials.

DISA S.A de C.V: Díaz Sánchez Sociedad Anónima de Capital Variable

FAA : Administración Federal Aviación

FHWH: Federal Highway Administration, (Administración Federal de Autopistas)

ISO: International Organization for Standardization, (Organización Internacional de Normalización)

IRI: International Roughness Index, (Índice de Regularidad Internacional)

LTS: Laser Texture Scanner, (Lector de Textura Laser)

MTD: Mean Texture Depth, (Profundidad media de la textura)

TMN: Tamaño Máximo Nominal

MS No 22: Manual Series No 22, (Serie de manuales No 22)

MOP: Ministerio de Obras Públicas

NCHRP-108: National Cooperative Highway Research Program, (Programa nacional cooperativa de autopistas)

SIECA: Secretaria de Integración Económica Centroamericana

PIARC: Asociación Mundial de Carreteras

RTFO: Prueba de la película delgada en horno rotatorio

TFO : Prueba de la película delgada en horno

TD: Profundidad de Textura

UPV: Unidad de Planificación Vial

VMA: Vacíos en el agregado mineral

VFA : Vacios llenos de asfalto

INTRODUCCIÓN

La presente investigación, tiene como tema la “Evaluación de la Macrotextura en pavimentos flexibles, contruidos con mezclas asfálticas densas, diseñadas por el Método Marshall”, su importancia se fundamenta en la necesidad de conocer la relación existente entre la Macrotextura en los pavimentos flexibles y la funcionalidad de las vías. Donde sus características, condiciones de superficie, seguridad y confort del usuario, son fundamentales para determinar la calidad de los servicios que estas prestan

La investigación es realizada a una mezcla asfáltica densa de tamaño máximo nominal del agregado grueso de $\frac{3}{4}$ ", diseñada atendiendo la metodología del Método Marshall, esto debido a que la mezclas más utilizadas en el país para la construcción de carpetas de rodadura son las mezclas asfálticas densas y por su economía el método que se utiliza para su diseño es el Método Marshall, este método supone que las propiedades de una mezcla asfáltica están en función de sus características. Por lo que, para esta investigación se realizaron todos análisis pertinentes que llevaron a la verificación de las características que la metodología Marshall establece para suponer que la mezcla es de buena calidad, teniendo como resultado del análisis de los ensayos de laboratorio realizados en la empresa DISA S.A. de C.V. una mezcla asfáltica densa con todos los parámetros y características establecidos por la metodología de diseño, por lo tanto se deduce que la mezcla asfáltica diseñada para esta investigación es de alta calidad y posee propiedades tales como estabilidad, durabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al deslizamiento, impermeabilidad y trabajabilidad, que la hacen apta para vías de alto tráfico.

La evaluación de la Macrotextura de la mezcla asfáltica diseñada se realizó por medio del método volumétrico del círculo de arena atendiendo la norma-

ASTM E-965 la cual establece las especificaciones pasos y procedimientos que se siguieron para llevar a cabo todos los ensayos necesarios para obtener la medida de la Macrotextura de la capa de rodadura en campo.

Por otra parte, en el presente documento nada más se establece el proceso y metodología utilizada para el diseño una mezcla asfáltica en caliente y la evaluación de su Macrotextura, sin ahondar en los procesos constructivos de la base, sub base, ni tratamientos a la sub rasante. Esta investigación ilustrar básicamente los procesos y ensayos que deben realizarse para diseño de una mezcla asfáltica densa con la metodología Marshall, y detalla paso a paso el procedimiento a seguirse para la evaluación de la Macrotextura en pavimentos flexibles por el método volumétrico del círculo de arena, permitiéndole al lector encontrar información necesaria acerca de las características más importantes de un pavimento flexible según la metodología Marshall.

CAPITULO I

GENERALIDADES DE LA INVESTIGACION

CAPITULO I

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

1.1.1. Red vial en El Salvador

El inicio de las carreteras en la historia de El Salvador, data desde 1528 (<http://www.mop.gob.sv>), fecha en la cual fue fundada por los españoles la Villa de San Salvador, en la cual tardaron quince días en trazar las calles, plaza e iglesia, en ese entonces las calles de los diferentes poblados eran únicamente de tierra y las principales reforzadas de piedra, ya que el vehículo de transporte utilizado eran los carretones o caballos.

La modernización de la infraestructura de transporte que comenzó con los ferrocarriles, pudiéndose apreciar en las principales ciudades de San Salvador y Santa Ana. Las carretas y carruajes que llevaban a las personas de un punto de la ciudad a otro fueron reemplazados primero por tranvías de tracción animal y después por tranvías eléctricos.

En la década de 1920 fueron asfaltadas las principales calles de San Salvador, y la mejoría de las calles obedecía también a otra consideración fundamental: la llegada del automóvil allá por 1915 y pocos años más tarde, del camión y del autobús. A partir de entonces el crecimiento de la infraestructura vial urbana e interurbana ha ido incrementándose aceleradamente, de acuerdo a la expansión de centros industriales, de producción, de servicios así como de los

habitacionales, prueba de ello es la ampliación de la “mancha urbana”, en la ciudad de San Salvador, la cual siempre se ha considerado la principal fuente generadora de crecimiento económico del país, esto genera una demanda de servicios, especialmente de comunicación y transporte, ya que sin ellos no se puede lograr la movilidad de productos para su comercialización.

En 1905 es creada una oficina bajo el nombre de Cuerpo de Ingenieros Oficiales. A esta oficina le correspondía la Dirección General de Obras Públicas como dependencia directa del Ministerio de Fomento, con la salvedad de que los trabajos de caminos eran realizados por el Ministerio de Gobernación. A este le correspondía la inmediata inspección técnica en la ejecución de todas aquellas obras que sin ser nacionales se auxilien con fondos del tesoro público, asignándole funciones de ejecución y mantenimiento de las obras públicas, así como la construcción y mantenimiento de los edificios destinados al servicio público, y en general, todas las obras de ornato y mejora de las poblaciones de la República, entre otras.

En 1916 el Poder Ejecutivo considerando la necesidad urgente de poseer buenas vías de comunicación en relación con el tráfico de ese entonces, así como por las necesidades individuales, comerciales, industriales y agrícolas del país y estimando que esto debe ser, por su gran importancia, objeto de dirección y estudio especial, totalmente separados del gran número de trabajos que tenía encomendado el Cuerpo de Ingenieros Oficiales y Dirección General de Obras Públicas, emitió el Decreto de creación de la Dirección General de Caminos, la cual funcionaría como una entidad técnica - consultiva, anexa al Ministerio de Gobernación y Fomento, la cual tendría a su cargo todo lo relacionado con las vías de comunicación de la República, puentes y obras que tengan relación con éstas.

Fue hasta en 1917, que se emite un Decreto Legislativo de creación del Ministerio de Fomento y Obras Públicas, la cual posteriormente asumiría todas las funciones encomendadas a las anteriores oficinas de regulación vial. En 1920, la Dirección General de Obras Públicas dentro del ramo de Fomento contaba con una Sección de Caminos, así como una Sección de Arquitectura, Saneamiento y Aguas y una Sección de Caminos, Puentes y Calzadas. En 1936, la Dirección de Obras Públicas estaba integrada por el Departamento de Hidráulica y Mantenimiento del Servicio de Aguas y de la Pavimentación de la Capital y por el Departamento de Urbanización y Arquitectura. En 1948, El Ministerio de Fomento y Obras Públicas contaba con la Dirección General de Carreteras. En 1949, El Ramo de Fomento y Obras Públicas estaba formado por:

- Secretaría de Estado
- Comisión Nacional de Electricidad
- Oficina de Cartografía y Geografía
- Bodega
- Dirección General de Obras Públicas
- Dirección General de Carreteras.

En 1951, el Ramo de Fomento y Obras Públicas estaba formado por:

- Secretaría de Estado
- Dirección de Bodegas, Talleres y Canteras
- Dirección de Caminos
- Dirección de Urbanismo y Arquitectura
- Dirección de Obras Hidráulicas, y
- Dirección de Cartografía

En 1952, la Dirección de Urbanización y Arquitectura cambia nombre a Dirección de Urbanismo y Arquitectura. En 1954, la Dirección de Urbanismo y

Arquitectura y la Dirección de Caminos, se convierte en Direcciones Generales dentro del Ramo de Obras Públicas. Todos estos cambios son producto de la necesidad de ordenar el crecimiento de las ciudades, tanto en su parte arquitectónica como en infraestructura, por lo cual se le encomiendan las funciones específicas de construir, mantener y rehabilitar la infraestructura urbana y vial del país, en esta última se incluyen las carreteras interurbanas, rurales y urbanas; las cuales se constituyen en uno de los pilares que sostiene la economía nacional.

Actualmente el Ministerio de Obras Públicas, dentro de su organización cuenta con tres Vice ministerios: de Transporte, el cual se encarga de la reglamentación del tráfico, tanto rural como urbano, así como de los transportes aéreos, terrestre y marítimos; De vivienda y Desarrollo Urbano, que se encarga de todo lo relativo a las proyecciones de desarrollo urbano, planificación y ejecución de los diferentes programas, cuyo objetivo primordial es disminuir el déficit habitacional del país; y de Obras Públicas, que es el encargado de dirigir la planificación, construcción, rehabilitación, reconstrucción, ampliación, expansión y mantenimiento de la infraestructura vial del país.

1.1.2. El asfalto

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 o 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, entre otros. 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.

En épocas modernas, se puede decir que en la segunda mitad del siglo XX, diversas instituciones en variedad de naciones han realizado esfuerzos para estudiar y conocer cada vez más el comportamiento y a la vez el uso óptimo de las mezclas asfálticas como capas de rodadura, en configuración de caminos y carreteras, para lo cual se han desarrollado distintas pruebas y mecanismos para dicho fin. (Rafael Crespín, Ismael S. &Pablo T., 2012, p110).

1.1.3. El método Marshall

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de Mezclas asfálticas en caliente 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 y desarrollo un criterio de diseño de mezclas. El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5"). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas

en caliente con graduación densa. (Rafael Crespín, Ismael S. & Pablo T., 2012, p 204).

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.

1.1.4. Macrotextura

La Textura es una propiedad física del pavimento y se define como “*la geometría más fina del perfil longitudinal de una carretera*” según la (Asociación Mundial de Carreteras, 1996). Se clasifica según la PIARC 1995 (Asociación Internacional Permanente de los Congresos de Carreteras), como Megatextura, Macrotextura y Microtextura de acuerdo a su longitud de onda y frecuencia espacial medida.

La Macrotextura, proporciona los intersticios necesarios para el escurrimiento del agua por el pavimento, de modo tal que la película de agua que sirve de fase entre el neumático y el pavimento, mantenga un cierto espesor que permita el contacto. Entre neumático y pavimento. Highways Agency (citado en la Dirección general de carreteras, 1999), ya que la Macrotextura garantiza una menor distancia de frenado o distancia de parada del vehículo de diseño, disminuye el problema del hidropneumático en pavimentos mojados y el derrapamiento de los neumáticos en los vehículos en las curvas.

Actualmente la Macrotextura en El Salvador es un parámetro no especificado para la habilitación de las carreteras, no así el **IRI** (International Roughness Index)

o también Índice de Regularidad Internacional, esto según en la experiencia de la CONSTRUCTORA DISA S.A. DE C.V. en proyectos viales desarrollados en el país, ya que en las especificaciones técnicas y propias de los proyectos no han sido solicitadas. Sin embargo en el proyecto de recarpeteo de la pista del Aeropuerto Internacional de El Salvador “Monseñor Oscar Arnulfo Romero y Galdámez” ha sido exigida la Macrotextura atendiendo las normas de la Administración Federal de Aviación **(FAA)** de los Estados Unidos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Después de los Acuerdos de Paz, en El Salvador ha habido avances significativos en cuanto a la reconstrucción y modernización de la red vial, esto ha significado un avance prometedor en el desarrollo del país, en cuanto a generación de empleo, así como la implementación de nuevas tecnologías para ser aplicadas en la construcción de obras viales.

En el desarrollo de construcción de vías se han aplicado normas regionales como las del Secretaria de Integración Económica Centroamericana (SIECA) que actualmente son las especificaciones para la construcción de las vías en la región Centroamericana, tanto para diseño geométrico y el tipo de importancia del camino como para el tipo de mezcla asfáltica de la superficie del pavimento.

Una de las principales características que debe cumplir un pavimento, se refiere a disponer de una superficie que asegure una buena adherencia con los neumáticos en todo instante y especialmente en zonas de frenado, curvas y cuando el pavimento se encuentra mojado, lo cual es fundamental para la seguridad de los usuarios. Roco, H. Fuentes, L. y Valverde ,P. (2003, p. 25).

Teniendo en cuenta esto, uno de los parámetros más importantes a evaluar en un pavimento es su Macrotextura, la cual depende del tipo de mezcla o carpeta asfáltica en la superficie del mismo. La Macrotextura de un pavimento a pesar de ser un parámetro determinante para la seguridad y confort del usuario no se han realizado investigaciones sobre la misma en nuestro país, considerando el tipo de agregados que serán utilizados, teniendo en cuenta que las mezclas más utilizadas en proyectos carreteros en el país son las mezclas densas, no se tiene una base documentada sobre el estudio de la Macrotextura.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

- Elaborar el Diseño de una mezcla asfáltica densa por medio del método Marshall, evaluando su Macrotextura mediante la técnica volumétrica del método del círculo de arena.

1.3.2. Objetivo Específicos

- Elaborar la mezcla de prueba y determinar la dosificación óptima por medio de ensayos de laboratorios, de manera que se cumpla con los requisitos establecidos de la metodología del método de diseño Marshall.
- Determinar de la Macrotextura de las mezclas asfálticas densas mediante la técnica volumétrica del método del círculo de arena y comparar el

resultado con la Macrotextura teórica obtenida a través de la fórmula del NCHRP-108 (National Cooperative Highway Program).

1.4. ALCANCES

La investigación ira enfocada a la elaboración del diseño de una mezcla asfáltica densa por medio del método Marshall, lo que permitirá la evaluación de su Macrotextura mediante la técnica volumétrica volumétrica del circulo de arena.

Para ello se tomarán en cuenta los siguientes parámetros:

- Implementar el método Marshall para el diseño de la mezcla asfáltica densa de TMN $\frac{3}{4}$ " la cual será objeto de estudio para la investigación.
- Evaluar la Macrotextura de la mezcla asfáltica diseñada e interpretar los resultados obtenidos para la aplicación en una carpeta asfáltica y contribuir con estudios sobre la seguridad vial de las carreteras en El Salvador.
- Implementar la técnica volumétrica de evaluación de la Macrotextura de pavimentos flexibles como lo es la del círculo de arena.
- Analizar los agregados que conformaran la mezcla asfáltica y se realizarán las diferentes pruebas de laboratorio requeridas para el diseño y verificar que cumplan con las especificaciones y estándares establecidos.

- La idea esencial para este trabajo de investigación es el de elaborar un documento en el que se encuentre información fundamentada que permita mostrar los métodos y procesos utilizados tanto para el diseño de la mezcla como para la evaluación de la Macrotextura.

1.5. LIMITACIONES

Para el desarrollo de la investigación “Evaluación de la Macrotextura en pavimentos flexibles, contruidos con mezclas asfálticas densas, diseñadas por el método Marshall” se presentan a continuación una serie de limitaciones entre la cuales podemos mencionar:

- Se realizarán los ensayos mínimos necesarios para esta investigación pero el tiempo en que estos ensayos se desarrollen estará limitado debido a la disponibilidad del equipo de laboratorio y la cantidad de trabajo que la empresa DISA S.A. de C.V. maneje durante el curso de esta investigación.
- La medición de la Macrotextura se limitara a la mezcla producida por la empresa DISA S.A. DE C. V.
- Existen diferentes materiales para medir la Macrotextura por el método del círculo de arena, como lo es la arena de Ottawa y las microesferas de vidrio pero esta investigación se estará limitado por el material que la empresa DISA S.A. DE C. V. proporcione.

1.6. JUSTIFICACION

La seguridad personal es importante en todos los aspectos, y debido a la globalización, al crecimiento urbano y poblacional; la seguridad vial no se puede dejar de lado. Accidentes debido al hidroplaneo, al deslizamiento de los neumáticos en las superficies de los pavimentos, un mal cálculo de la distancia de parada en el frenado, son algunos de los más comunes y de los cuales pueden evitarse o disminuirse con una Macrotextura adecuada de la superficie de los pavimentos.

El Salvador se encuentra en pleno desarrollo, parte de este es la construcción de una nueva red de vías de comunicación entre los que se puede mencionar la carretera Longitudinal del Norte, tramo Chiltiupan- La Libertad que es un nuevo proyecto de pavimentación en la cordillera del bálsamo entre otros. Por lo cual es importante que estas cumplan con los estándares de calidad y comodidad necesarios que conlleven a una mejor seguridad y confort del usuario.

Comúnmente cuando se habla de pavimentos flexibles se consideran varios tipos de mezclas asfálticas, pero que por las condiciones económicas y de conveniencia, la empresa **DISA S.A. de C.V.** propone el diseño de las mezclas densas con un tamaño máximo nominal de agregado de $\frac{3}{4}$ ", utilizando el método básico Marshall, por ser estas las únicas que en nuestro país se utilizan para la construcción de proyectos carreteros.

Las Mezclas densas o cerradas son aquellas que contienen cantidades de agregados en proporciones adecuadas de todos los tamaños, de grueso a fino,

incluyendo filler, proporcionados de tal forma de obtener una mezcla densa con pocos vacíos. La proporción de vacíos no supera el 5 %. Las mezclas densamente graduadas tienen un gran número de puntos de contacto entre las partículas, que pueden dar una alta resistencia friccional y reducir la posibilidad de trituración de las partículas en los puntos de contacto. Como el contenido de vacíos es bajo son poco permeables.

CAPITULO II

MARCO REFERENCIAL Y CONCEPTOS

FUNDAMENTALES

CAPITULO II

2. MARCO REFERENCIAL Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1. VÍAS PAVIMENTADAS Y NO PAVIMENTADAS 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).

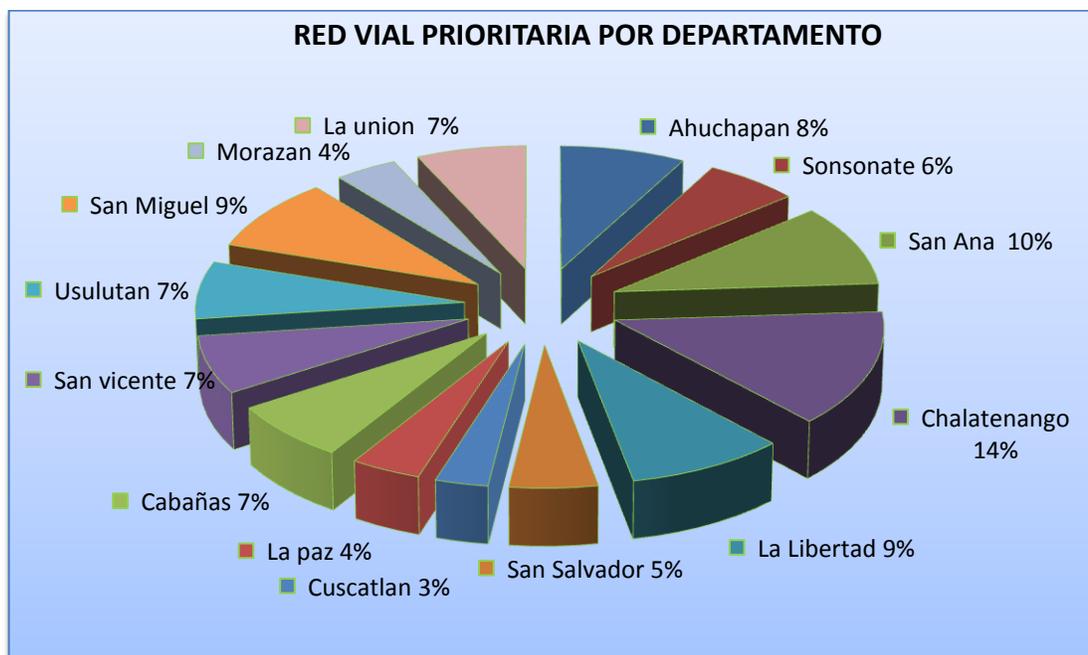


Figura 2.1 Red vial nacional prioritaria no pavimentada, en porcentaje por Departamento. Fuente: Fuente: Ministerio de Obras Públicas. (MOP), Unidad de Planificación Vial (UPV)

ZONA	DEPARTAMENTO	RED VIAL NACIONAL PRIORITARIA EN KM.	
		VIAS PAVIMENTADAS	VIAS 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
PARACENTRAL	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

Tabla 2.1 Red Vial Nacional Prioritaria Pavimentada y no Pavimentada.

2.2. MATERIALES PÉTREOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO

De acuerdo con Marlon Guevara, Hosni Méndez y Juan Pimentel (2010, pp.-34-41), 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 encontrarse 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.

2.2.1. Mineralogía

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.

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. Clasificación de los agregados pétreos

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 2.2) 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.



Figura. 2.2 Explotación del agregado, Fuente: Presentación de los autores

2.2.2.1. Clasificación por el tamaño de las partículas

De acuerdo al tamaño de las partículas, estos pueden tomar los siguientes nombres:

Guijarros	Mayores de 3 pulg. (7.5 cm)
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 pétreos

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:

- 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) Coeficiente 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-T96 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.

2.3. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas producidas por el tránsito y las transmiten a los estratos inferiores de manera distribuida, proporcionando una superficie de rodamiento que debe trabajar eficazmente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia que controle las cargas para evitar el agrietamiento, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aún en condiciones húmedas.

Deberá presentar una resistencia adecuada a los efectos abrasivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas. Puesto que los esfuerzos en un

pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías; además, que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza y consecuentemente más económicos. La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, cuando se determina el espesor de una capa el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior. La resistencia de las diferentes capas dependerá del material que la constituye y el procedimiento constructivo; dos factores importantes son la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas de tráfico, produciendo deformaciones permanentes.

2.4. TIPOS DE PAVIMENTO

Existen dos tipos de pavimentos:

- Rígidos
- Flexibles

2.4.1. Pavimento Rígido

El pavimento rígido se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas.

2.4.2. Pavimento Flexible

Un pavimento flexible es una estructura de ingeniería en contacto con el suelo, la

cual sirve para el transporte de personas y de bienes. Está constituida por una capa delgada de mezcla asfáltica construida sobre una capa de base y una capa de subbase las cuales usualmente son de material granular, ver figura 2.3 Componentes de un pavimento. Se construyen con distintos fines, tales como:

- Intercambio comercial
- Seguridad
- Mejorar acceso
- Mejorar movilidad
- Incremento de actividad económica

Por lo que se requiere que un pavimento flexible sea:

- Confortable
- Con buen acceso
- Seguro
- Durable
- De bajo costo

Un pavimento flexible está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados.

Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. Los pavimentos flexibles están formados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las

necesidades particulares de cada obra. Un pavimento de una estructura, tiene por finalidad proporcionar una superficie de rodamiento que permita el tráfico seguro y confortable de vehículos, a velocidades operacionales deseadas y bajo cualquier condición climática.



Figura 2.3 - Componentes de una carpeta asfáltica

2.5. CONCEPTOS BÁSICOS DE ASFALTO

2.5.1. Definición de asfalto

Los asfaltos son una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado, que se presentan en forma de cuerpo viscoso más o menos elástico, no cristalino y de color negro. Son productos de la destilación natural o artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda una vez que se hayan extraído los componentes más ligeros y volátiles del petróleo según (Lesser Linares. Rebeca Moran y Raúl Peñate, 2010, pp.16-27)

Casi todo el asfalto usado 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 las faltos para pavimentación, techado y otros usos especiales.

El asfalto usado en pavimentación, generalmente llamado cemento asfáltico, es un material viscoso (espeso) y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y, por lo tanto, es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente. El cemento asfáltico es un excelente material impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico.

El asfalto cambia cuando es calentado a temperatura muy elevada y/o es envejecido. Tiende a volverse duro y frágil y también a perder parte de su capacidad de adherirse a las partículas de agregado. Estos cambios pueden ser minimizados si se comprenden las propiedades del asfalto, y si se toman medidas, durante la construcción, para garantizar que el pavimento terminado sea construido de tal manera que pueda retardarse el proceso de envejecimiento.

2.5.2. Propiedades físicas del asfalto

Antes que el intercambio de crudo en el mercado fuera algo cotidiano, las refinerías rara vez cambiaban sus fuentes de abastecimiento de crudo. Esto llevo a que las fuentes de asfalto tuvieran propiedades consistentes, al integrar el cambio del abastecimiento de crudo de las refinerías se crearon más variaciones en las propiedades del asfalto, tanto físicas como químicas.

De estas variaciones, surgió la necesidad de poder evaluar el comportamiento del asfalto ante condiciones particulares y predecir su rendimiento por medio de

sus propiedades geológicas. Aun así, algunas propiedades físicas y químicas siguen siendo constantes en todos los tipos de asfaltos. Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son:

a) 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 las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ligante bituminoso debe ser capaz de envolver a los áridos, dar cohesión a la mezcla y resistir la acción de desmenuamiento del agua (Figura 2.4), tal efecto produce una separación del ligante con el árido disminuye así la cohesión de la mezcla.

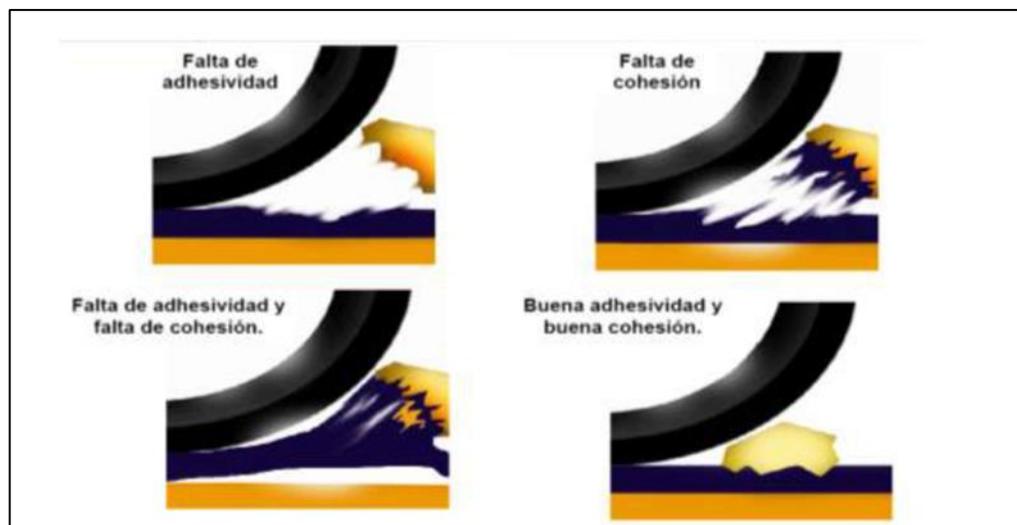


Figura 2.4 - Propiedades del Asfalto Adhesión y Cohesión expuestas al agua, <http://www.circulaseguro.com/via-y-climatologia/por-que-ocurre-el-aquaplaning>

b) 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.

c) 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.

d) 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.

e) 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).

f) Punto de Inflamación

El punto de inflamación de un cemento asfáltico es la temperatura más 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 más baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y se quema.

g) 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.

h) 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.

i) 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.

j) 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.

k) Susceptibilidad Térmica

Todos los asfaltos son termoplásticos; esto es, se vuelven más duros (mas viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más 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.

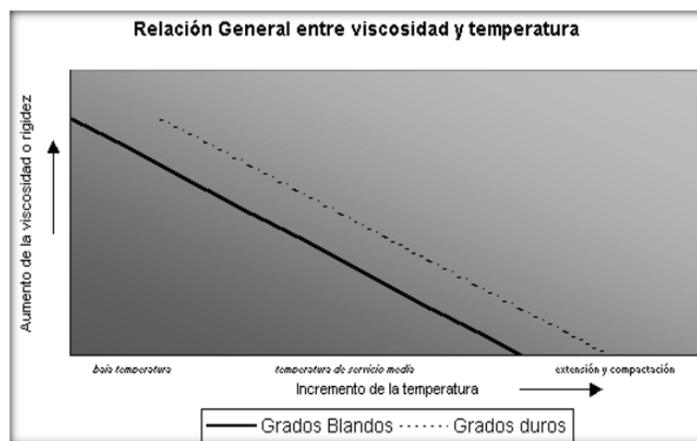


Figura 2.5 - Influencia de la temperatura en los ligantes asfálticos, Investigación “Evaluación de las propiedades de los Asfaltos modificados con polímeros” A.Chiman, L.Sanabria, L.Hernandez, L.Chiman

Es importante conocer la susceptibilidad a la temperatura utilizada, ella indica la temperatura adecuada a la cual se debe mezclar el asfalto con el agregado y la temperatura a la cual se debe compactar la mezcla sobre la base de la carretera. Debe entenderse que es de vital importancia que un asfalto sea susceptible a la temperatura. Debe tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficientemente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

I) 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 la durabilidad del asfalto. Estas son la Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO).

2.5.3. Propiedades químicas del asfalto

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 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: asfáltenos y máltenos, como se presenta en la figura 2.6, una clasificación en forma esquemática de su composición química.

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras. Básicamente, el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno; casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono. El asfalto, cuando es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfáltenos y máltenos (ver Figura 2.6).

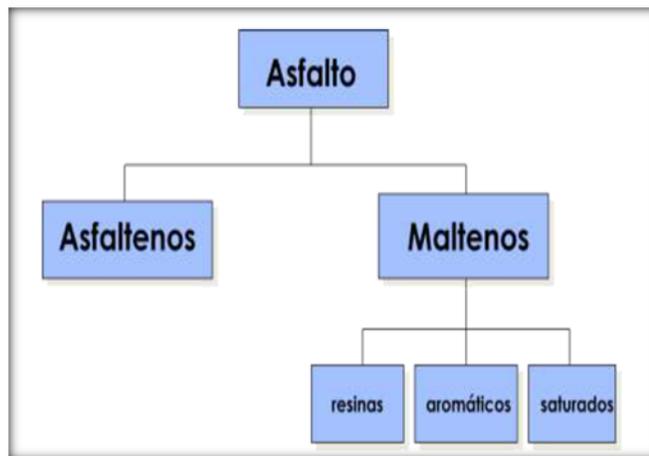


Figura 2.6 Composición del Asfalto, Tesis "Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente "José Mauricio Cortez, Hugo Wilfredo Guzmán, Amílcar Daniel Reyes.

Los asfaltenos no se disuelven en el heptano. Los asfaltenos una vez separados de los máltenos son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito. Los asfaltenos 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 más claro.

Las resinas proporcionan las cualidades de adhesivas (pegajosidad) en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfaltenos (parte sólida) y las resinas como se observa en la figura 2.7. La proporción de asfaltenos 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.

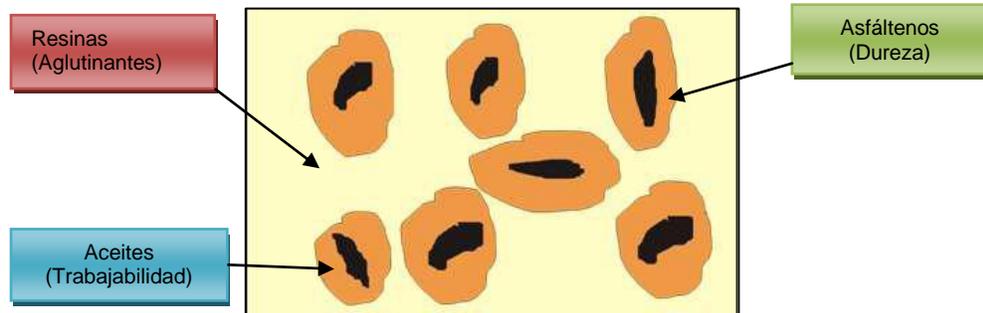


Figura 2.7 Cualidades de los componentes del asfalto

Las reacciones y cambios que pueden ocurrir incluyen: evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburo con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o más 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.

2.6. SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

La clasificación de los cementos asfálticos, ha girado alrededor de las propiedades físicas de los mismos, determinados a través de métodos de ensayos que en su mayoría son empíricos; lo anterior, principalmente debido a la complejidad y variabilidad de las propiedades o características químicas de los asfaltos. Los sistemas tradicionalmente utilizados para la clasificación de los asfaltos corresponden a:

1. Sistema de Clasificación por Penetración
2. Sistema de Clasificación por Viscosidad

2.6.1. Sistema de clasificación por penetración

El método de penetración fue el primer sistema desarrollado para la clasificación de asfaltos y todavía es utilizado por diferentes agencias de carreteras en la región. Dicho sistema fue desarrollado en 1918 por el Bureau of Public Works (ahora Federal Highway Administration, FHWA), y posteriormente en 1931, la AASHTO publicó las primeras especificaciones técnicas para la clasificación de asfaltos por penetración. Asimismo, en 1921 la ASTM desarrolló la primera especificación para cementos asfálticos clasificados por penetración para propósitos de pavimentación, la cual sufrió un cambio significativo en 1968, al reducir el número de tipos de cemento asfáltico de 10 a 5. Cabe señalar que la clasificación del asfalto por penetración, conlleva el desarrollo de una serie de ensayos de laboratorio, los cuales están contemplados en la norma ASTM D 946, "Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction".

A continuación, en la Tabla 2.2, se presentan las características físicas que deben cumplir los cementos asfálticos, para ser clasificados de acuerdo a la norma ASTM D 946.

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO	ENSAYO PORPENETRACION(GRADOS DE PENETRACION)									
		40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
PENETRACION (0.1 mm)	D5	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
FLASH POINT (°C)	D92	232	-	239	-	232	-	218	-	177	-
DUCTIBILIDAD (cm)	D113	100	-	100	-	100	-	100	-	100	-
SOLUBILIDAD (%)	D2042	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
ENSAOS EN RESIDUOS DE ASFALTO DESPUES DE ENSAYO DE PELICULA DELGADA ASTM D 1754											
PENETRACION (%)	D5	55	-	52	-	47	-		-	37	-
DUCTIBILIDAD (cm)	D113	-	-	50	-	75	-		-	100	-

Tabla 2.2. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 946-82.

2.6.2. Sistema de clasificación por viscosidad

El sistema de clasificación por viscosidad fue introducido a principios de la década de 1960, mediante el cual es posible clasificar cementos asfálticos en estado virgen y en residuos asfálticos. Dicho sistema de clasificación fue concebido debido a las limitantes que presenta el sistema de clasificación por penetración, que posee la imposibilidad de evaluar la susceptibilidad térmica del asfalto o no poder evaluar el comportamiento del mismo a temperaturas normales de operación de la mezcla asfáltica.

Los ensayos requeridos para la clasificación del asfalto, están contemplados en la norma ASTM D 3381, “*Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction*”. Dentro de esta especificación se encuentran los asfaltos clasificados por Viscosidad (AC) y Residuo asfáltico (AR), los cuales se detallan a continuación:

a) Viscosidad (AC): Los ensayos se realizan en el asfalto original (virgen), entre los asfaltos clasificados por viscosidad, tenemos los siguientes: AC 5, AC 10, AC 20, AC 30, AC 40.

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO	CLASIFICACION POR VISCOSIDAD(GRADOS BASADOS EN ASFALTO ORIGINAL)									
		AC-5		AC-10		AC-20		AC30		AC-40	
		MIN	MA X	MIN	MA X	MIN	MA X	MIN	MA X	MIN	MA X
VISCOSIDAD ABSOLUTA(P OISE)	D2171	400	600	800	1200	1600	2400	2400	3600	3200	4800
VISCOSIDAD CINEMÁTICA (cSt)	D2171	175	-	250	-	300	-	350	-	400	-
PENETRACIÓN (0.1mm)	D5	140	-	80	-	60	-	350	-	400	-
FLASH POINT(°C)	D92	177	-	219	-	232	-	232	-	232	-
SOLUBILIDAD (%)	D2042	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
ENSAYOS EN RESIDUOS DE ASFALTO DESPUÉS DE ENSAYO DE PELÍCULA DELGADA ASTM D 1754											
VISCOSIDAD ABSOLUTA (POISE)	D2171	250	-	500	-	1000	-	1500	-	2000	-
DUCTILIDAD (cm)	D113	100	-	75	-	50	-	40	-	25	-

Tabla 2.3. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381

En la Tabla 2.3, se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos.

Residuo (AR): Los asfaltos clasificados por residuo son más conocidos como asfaltos clasificados por viscosidad después de envejecido, entre los cuales se encuentran los siguientes: AR-1000, AR-2000, AR-4000, AR-8000 y AR-16000. A continuación, en la Tabla 2.4, se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos.

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO	CLASIFICACION POR VISCOSIDAD (GRADOS BASADOS EN ASFALTO ORIGINAL)									
		AR-1000		AR-2000		AR-4000		AR-8000		AR-16000	
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
VISCOSIDAD ABSOLUTA (POISE)	D2171	750	1250	1500	2500	3000	5000	6000	10000	12000	20000
VISCOSIDAD CINEMATICA (cSt)	D2171	140	-	200	-	275	-	400	-	550	-
PENETRACION (0.1mm)	D5	65	-	40	-	25	-	20	-	20	-
% DE PENETRACION ORIGINAL		-		40		45		50		52	
DUCTILIDAD		100		100		75		75		75	
ENSAOS EN RESIDUOS DE ASFALTO DESPUES DE ENSAYO DE PELICULA DELGADA ASTM D 1754											
FLASH POINT (°C)	D 92	205	-	219	-	227	-	232	-	238	-
DUCTILIDAD (cm)	D2042	99		99		99		99		99	

Tabla 2.4. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381

2.7. CONCEPTOS BÁSICOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.7.1. Definición de mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transporta después a la obra y allí se extienden y se compactan. Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, en las capas inferiores de los pavimentos para tráfico pesados intensos, entre otros.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en

alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

2.7.2. Clasificación de las mezclas asfálticas

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

- Por Fracciones de Agregado Pétreo Empleado
- Por la Proporción de Vacíos en la Mezcla Asfáltica
- Por el Tamaño Máximo del Agregado Pétreo
- Por la Estructura del Agregado Pétreo
- Por Granulometría

2.7.2.1. 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.
-
- **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.
 - **Mezclas asfálticas en frío:** El ligante suele ser una emulsión asfáltica y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

2.7.2.2. Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica

Este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia de las cargas y de las variaciones térmicas.

- **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 supera el 20%.

2.7.2.3. Por el Tamaño Máximo del Agregado Pétreo

- **Mezclas Gruesas:** donde el tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- **Mezclas Finas:** también llamadas microaglomerados, pueden denominarse también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas básicamente por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante 29 asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

2.7.2.4. 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.

2.7.2.5. Por 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 el huso granulométrico.

A continuación en la tabla 2.5 se presenta un resumen de los tipos parámetros de clasificación de las mezclas asfálticas:

PARÁMETRO DE CLASIFICACIÓN	TIPO DE MEZCLA
FRACCIONES DE AGREGADO EMPLEADAS	MASILLA
	MORTERO
	CONCRETO
	MACADAM
TEMPERATURAS PUESTA EN OBRA	EN FRIO
	EN CALIENTE
HUECOS EN LA MEZCLA (h)	CERRADAS ($h < 6\%$)
	SEMICERRADAS ($6\% < h < 12\%$)
	ABIERTAS ($h > 12\%$)
	POROSAS ($h > 20\%$)
TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO (t Max)	GRUESAS (t Max $> 10\text{mm}$)
	FINAS (t Max $< 10\text{mm}$)
ESTRUCTURA DE AGREGADO	CON ESQUELETO MINERAL
	SIN ESQUELETO MINERAL
GRANULOMETRIA	CONTINUAS
	DISCONTINUAS

Tabla 2.5. Clasificaciones de las Mezclas Asfálticas- Capítulo 3 “Mezclas Asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.

2.7.3. Tipología de las mezclas asfálticas

2.7.3.1. Mezcla asfáltica en caliente

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y 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. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los pavimentos. Existen a su vez subtipos dentro de esta familia de mezclas

con diferentes características. Se fabrican con asfaltos aunque en ocasiones se recurre al empleo de asfaltos modificados, las proporciones pueden variar desde el 3% al 6% de asfalto en peso de agregados pétreos.

2.7.3.2. 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. Para retrasar el envejecimiento de las mezclas abiertas en frío se suele recomendar el sellado por medio de lechadas asfálticas. Se usan además en las bases y capas intermedias, su mayor utilidad esta en el mantenimiento, llámese reciclado, microsurfacing o estabilización.

Se caracterizan por su trabajabilidad tras la fabricación incluso durante semanas, la cual se debe a que el ligante permanece un largo periodo de tiempo con una viscosidad baja debido a que se emplean emulsiones con asfalto fluidificado: el aumento de la viscosidad es muy lento en los acopios, haciendo viable el almacenamiento, pero después de la puesta en obra en una capa de espesor reducido, el endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante. Existe un grupo de mezclas en frío, el cual se fabrica con una emulsión de rotura lenta, sin ningún tipo de fluidificante, pero es menos usual, y pueden compactarse después de haber roto la emulsión.

El proceso de aumento paulatino de la resistencia se le suele llamar maduración, que consiste básicamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente aumento de la cohesión de la mezcla.

2.7.3.3. Mezcla porosa o Drenante

Se emplean en capas de rodadura, principalmente en las vías de circulación rápida, se fabrican con asfaltos modificados en proporciones que varían entre el 4.5 % y 5 % de la masa de agregados pétreos; con asfaltos normales, se aplican en vías secundarias, en vías urbanas o en capas de base bajo los pavimentos de hormigón.

Utilizadas como mezclas en caliente para tráficos de elevada intensidad y como capas de rodadura en espesores de unos 4 cm., se consigue que el agua lluvia caída sobre la calzada se evacue rápidamente por infiltración.

2.7.3.4. Microaglomerados

Son mezclas con un tamaño máximo de agregado pétreo limitado inferior a 10mm., lo que permite aplicarlas en capas de pequeño espesor. Tanto los microaglomerados en Frío (se le suele llamar a las lechadas asfálticas más gruesas) como los microaglomerados en Caliente son por su pequeño espesor (que es inferior a 3 cm.) tratamientos superficiales con una gran variedad de aplicaciones.

Tradicionalmente se han considerado adecuados para las zonas urbanas, porque se evitan problemas con las alturas libres de los gálibos y la altura de los bordillos debido a que se extienden capas de pequeño espesor.

Hay microaglomerados con texturas rugosas hechas con agregados pétreos de gran calidad y asfaltos modificados, para las vías de alta velocidad de circulación.

CAPITULO III

DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

CAPITULO III

3. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

3.1. DEFINICIÓN

Haciendo referencia a los aportes de Rafael Crespín, Ismael Santa Cruz y Pablo Torres (2012, pp. 180-231), las mezclas asfálticas, es material que está formada por una combinación de agregados pétreos, ligante hidrocarbonado, y aditivo en algunos casos; de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento de la carpeta de rodadura y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Existen tres métodos de diseño utilizados para determinar las proporciones adecuadas de asfalto y agregados. Ellos son el Método Marshall y el Método Hveem, actualmente el método que se utiliza en EEUU es el método SUPERPAVE ya que se considera que la metodología de diseño está basada en pruebas más reales y científicas y no empíricas como las del método Marshall; debido a las condiciones económicas los países como el nuestro se sigue utilizando es el método Marshall.

3.2. EVOLUCION DE LOS DISEÑOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

A continuación se muestra la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente:

1. The Hubbard-Field (1920's). Método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral.

Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.

2. 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.

3. Método Hveem (1930's). Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall, Evalúa una estabilidad pseudotriaxial.

4. Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials WASHTO (1984). Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de

mezclas para mejorar la resistencia a las roderas (efectos de deformación acumulada).

5. Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987).

La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia de grietas a baja temperatura.

6. Método SUPERPAVE (1993). El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas.

SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

3.3. CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA ASFALTICA

De acuerdo con el método Marshall en los aportes de Crespín, R. Santa Cruz, I. y Torres, P.(2012, pp. 187-205), la mezcla asfáltica en caliente preparada en

laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla. Las cuales se detallan a continuación:

3.3.1. Densidad:

Está definida como su peso unitario, es decir, el peso de un volumen específico de mezcla compactada. La densidad es una característica importante para obtener un rendimiento duradero. Si la densidad es baja la cantidad de vacíos son mayores, por lo tanto, la mezcla compactada será vulnerable al agua. Si la densidad es alta la cantidad de vacíos es menor, el agua no entrara en su interior obteniéndose de esta manera una carpeta de rodadura mas durable. La densidad de la muestra compactada se expresa en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (lb/pe^3), se calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ($1,000 \text{ kg/m}^3$ o 62.416 lb/pe^3). La densidad patrón obtenida en laboratorio se utiliza como referencia para determinar si la densidad del pavimento compactado en la obra es adecuada o no. Difícilmente en la compactación in-situ se obtiene la densidad patrón, por lo tanto las especificaciones permiten un porcentaje aceptable.

3.3.2. Vacios de aire:

Están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla compactada y son pequeños espacios de aire, o bolsas de aire. Es de mucha importancia que las mezclas densamente graduadas contengan determinado porcentaje de vacíos, ya que estos permiten que el asfalto fluya durante la compactación adicional debido al tráfico. El porcentaje, en muestras elaboradas en

laboratorio, para capas de base y capas superficiales debe estar entre 3% y 5%. La permeabilidad de una mezcla asfáltica tiene relación con la durabilidad de un pavimento asfáltico.

A mayor permeabilidad, mayor contenido de vacíos; permitiendo pasajes a través de la mezcla del agua y el aire causando un deterioro irreversible a la carpeta asfáltica.

Por otra parte un contenido muy bajo de permeabilidad, es decir bajo contenido de vacíos, tiende a producir exudación de asfalto. La exudación consiste en que el exceso de asfalto es exprimido, o expulsado fuera de la mezcla hacia la superficie.

La relación de la densidad y el contenido de vacíos demuestra que a mayor densidad, menor porcentaje de vacíos y a menor densidad, mayor porcentaje de vacíos en la mezcla. En campo las especificaciones para la densidad requieren acomodar el menor número posible de vacíos inferior al 8%.

3.3.3. Vacíos en el agregado mineral (VMA):

Son los espacios de aire que existen de entre las partículas de agregado y los espacios que están llenos de asfalto en una mezcla asfáltica compactada de pavimentación. Es decir el VMA es el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla.

El volumen efectivo de asfalto es todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción, en el agregado. Si el VMA es mayor, existirá más espacio para la película de asfalto. Hay que tener en cuenta que entre más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado se obtiene mayor durabilidad de una mezcla. Por lo anteriormente descrito existen valores mínimos de VMA recomendados y especificados en función del tamaño del agregado. Puede resultar que para economizar el contenido de asfalto en un diseño de

mezcla disminuimos los valores de VMA establecidos como mínimos (Ver Tabla 3.3), siendo esto completamente perjudicial y dañino para la calidad de la carpeta asfáltica, obteniéndose películas delgadas de asfalto en el agregado y una mezcla de baja durabilidad y apariencia seca.

3.3.4. Contenido de asfalto:

El contenido de asfalto de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de asfalto para cubrir todas las partículas.

Las mezclas gruesas exigen menos asfalto debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (No. 200)) existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de asfalto, resultando una mezcla inestable y seca. Caso contrario al efectuar pequeñas disminuciones de filler nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).



Figura 3.1-Diagrama de componentes de una Mezcla Asfáltica HMA, FUENTE: Strategic Highway Research Program SHRP A-369

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto.

Técnicamente se habla de dos tipos de asfalto al referirse al asfalto absorbido y el no-absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto. El contenido total de asfalto: cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla.

El contenido efectivo de asfalto: volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto. La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla.

3.3.5. Vacíos llenos de asfalto VFA:

Son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregado (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, y por lo tanto, el VFA se calcula al restar los vacíos de aire del VMA, y luego dividiendo por el VMA, y expresando su valor como un porcentaje.

3.4. PROPIEDADES DE LA MEZCLA ASFALTICA

Para obtener una mezcla de calidad, esta debe poseer las propiedades siguientes: Estabilidad, Durabilidad, Flexibilidad, Resistencia a la Fatiga, Resistencia al Deslizamiento, Impermeabilidad y Trabajabilidad.

3.4.1. Estabilidad:

Es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas por el tránsito. La carpeta asfáltica debe de ser capaz de mantener su forma y textura ante las secuencias de carga que a diario le son impuestas. La fricción interna depende de la textura superficial, graduación del agregado, forma de la partícula, densidad de la mezcla, y, del contenido y tipo de asfalto. La estabilidad es función de la fricción y la resistencia inter-bloqueada del agregado en la mezcla. Cuando sobrepasamos el nivel óptimo de asfalto la película es demasiado gruesa y esto genera que la cohesión decrezca, resultando en pérdida de fricción entre las partículas que componen la mezcla asfáltica. Es importante que las partículas que componen el agregado sean angulares y ásperas en su textura superficial, esto dará una alta estabilidad a la mezcla.

Los problemas clásicos debido a una estabilidad baja se detallan a continuación:

a) Ahuellamiento: consiste en una depresión continua a lo largo de la capa de rodadura. (ver Figura 3.2). Las cargas repetitivas de tránsito conducen a deformar permanentemente cualquier capa que componen la estructura del pavimento, sin embargo cuando la carpeta asfáltica recién colocada presenta ahuellamiento es debido al exceso de asfalto en la mezcla, es decir el óptimo de asfalto se ha sobrepasado y genera por consiguiente pérdida de cohesión.

El ahuellamiento también es producido por la forma redondeada de la partícula, por la falta de textura áspera, falta de adherencia y absorción del agregado. Es decir, si una mezcla tiene un óptimo de asfalto y sus agregados no cumplen con las siguientes propiedades tales como: graduación, limpieza, dureza, textura superficial, capacidad de absorción, afinidad con el asfalto, peso específico, también nos generara ahuellamiento y una serie de problemas que desarrollaremos en este capítulo.



Figura 3.2 Ahuellamiento

FUENTE: SIECA Manual Centroamérica de Mantenimiento de Carreteras TOMO III. Pág. 16.

b) Corrimiento: desplazamiento de la mezcla asfáltica provocando distorsiones en la superficie de la carpeta asfáltica. (Ver Figura 3.3). Acompañado

a veces por levantamiento de material formando cordones, principalmente laterales. Estos desplazamientos son ocasionados por las cargas de tránsito y son debido al exceso de asfalto, falta de vacíos o bien por falta de confinamiento lateral. La corrugación son una serie de ondulaciones constituidas por crestas y depresiones, perpendiculares a la dirección del tránsito, siendo próximas unas de otras, por lo general menores a 1.0 mts entre ellas.



**Figura 3.3 Corrimiento, FUENTE SIECA Manual
Centroamérica de Mantenimiento de Carreteras TOMO III. Pág. 17.**

c) Exudación del asfalto: es el afloramiento del asfalto o ligante asfáltico hacia la superficie de la carpeta asfáltica. Formando una película continua de ligante, creando una superficie brillante, reflectante, resbaladiza y pegajosa durante las altas temperaturas. (ver figura 3.4.). Es causado específicamente por un excesivo contenido de asfalto. Ocurre en mezclas con un porcentaje de vacíos deficiente, durante épocas calurosas. El proceso de exudación no es reversible durante el tiempo frío, por tal motivo el asfalto se acumula en la superficie.



Figura 3.4 Exudación ó Afloramiento FUENTE: SIECA Manual Centroamérica de Mantenimiento de Carreteras TOMO III. Pág. 24.

Una mezcla con estabilidad baja. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

3.4.2. Durabilidad:

Es la propiedad de una mezcla asfáltica para resistir los efectos perjudiciales causados por el agua, aire, temperatura y las cargas debidas al tráfico. Estos efectos perjudiciales provocan desintegración del agregado, cambio en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), envejecimiento, segregación, etc.

Puede mejorarse la durabilidad de una mezcla asfáltica de tres maneras:

a) Utilizando un contenido óptimo de asfalto: se aumenta la durabilidad de la mezcla ya que las partículas del agregado están cubiertas por una película

gruesa de asfalto. Esto evita el envejecimiento y el endurecimiento del asfalto, reteniendo por más tiempo las características originales tanto del asfalto como de los agregados.

b) Utilizando una graduación densa: esto proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, mejorando así la impermeabilidad de la mezcla.

c) Diseñar y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad: esto se logra mediante la compactación por medios mecánicos utilizando maquinaria y equipo adecuado.

Tabla 3.1 Causas y efectos de la poca durabilidad. Tomada de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

CAUSAS	EFFECTOS EN LA CARPETA
Bajo contenido de asfalto	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración
Agregado susceptibles al agua (hidrofilitos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando una carpeta de rodadura desgastada ó desintegrada

3.4.3. Flexibilidad:

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamiento, soportando los movimientos graduales y asentamientos de la base y sub-base. Los asentamientos en el pavimento pueden ocurrir debido a que falle cualquiera de sus componentes. Provocando daños visibles en la carpeta de rodadura.

De hecho, todas las estructuras tienden a tener asentamientos diferenciales. La flexibilidad de las mezclas asfálticas es incrementada agregando mayor contenido de asfalto, hasta llegar al contenido óptimo, a partir de este, si se aumenta en exceso el contenido de asfalto la carpeta tiende a ser extremadamente flexible y provoca entonces una mezcla con estabilidad baja. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

3.4.4. Resistencia a la fatiga:

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir la flexión repetida causada por las cargas de tránsito. Si el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Por tal razón, las mezclas asfálticas de graduación densa presentan mayor resistencia a la fatiga que las mezclas asfálticas de graduaciones abiertas. El envejecimiento y endurecimiento del asfalto en la carpeta de rodadura da como resultado menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la sub-rasante, influyen determinantemente en la vida útil de una carpeta de rodadura asfáltica. Si la carpeta asfáltica presenta buena resistencia a la fatiga y la sub-base está mal compactada, se verán claramente los asentamientos y la resistencia a la fatiga disminuye considerablemente. Caso contrario si la sub-base está bien compactada y la carpeta asfáltica presenta mala resistencia a la fatiga la carpeta se dañará. Por lo anterior, el pavimento debe trabajar en conjunto para que pueda resistir la flexión causada por el tránsito.

Entre algunos daños visibles debido a una mala resistencia a la fatiga se detallan a continuación:

a) Fisura piel de cocodrilo: serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, generalmente con un diámetro promedio menor a 30 cm. El fisuramiento empieza en la parte inferior de la carpeta asfáltica, donde las tensiones y deformaciones por tracción alcanza su valor máximo, cuando el pavimento es solicitado por una carga. Las fisuras se propagan a la superficie, evolucionan interconectándose y formando una malla cerrada, que asemeja el cuero de un cocodrilo.

La fisura piel de cocodrilo son causadas por la fatiga que sufre la carpeta de asfáltica al ser sometidas a las cargas repetidas del tránsito. Por lo general, el fisura miento indica que el pavimento ya no tiene capacidad estructural de sostener las cargas de tránsito y ha llegado al fin de su vida útil. El ligante por lo general ha envejecido y por ende ha perdido la flexibilidad de sostener cargas repetidas al tránsito sin agrietarse.

b) Fisuras en bloque: serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, de diámetro promedio mayor de 30 cm, con un área variable de 0.10 a 9.0 m². Se presenta generalmente en una gran área de la carpeta asfáltica y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico. Son causadas principalmente por la contracción de las mezclas asfálticas debido a las variaciones diarias de temperatura. A menudo es difícil constatar si las fisuras y grietas son debido a contracciones producidas en la carpeta asfáltica o en la base y sub-base.

La presencia de fisuras en bloques generalmente es un indicativo de que el asfalto se ha endurecido significativamente.

c) Fisura transversal: fracturación de longitud variable que se extiende a través de la superficie de la carpeta asfáltica, formando un ángulo aproximadamente recto con el eje de la carretera. Puede afectar todo el ancho del carril como limitarse a los 0.60 m próximos al borde lateral de la carpeta de rodadura. La contracción de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad, es decir si una carpeta asfáltica no tiene la capacidad de flexionar repetitivamente la resistencia a la fatiga es menor o nula. Puede ser ocasionado por un exceso de filler, envejecimiento asfáltico, etc. Particularmente ante la baja temperatura y gradientes térmicos importantes.

d) Peladura: desintegración superficial de la carpeta asfáltica como consecuencia de la pérdida de ligante bituminoso y del desprendimiento del agregado pétreo, aumentando la textura de la carpeta asfáltica pavimento y exponiendo cada vez más los agregados a la acción del tránsito y el clima. Esta anomalía es un indicativo que el asfalto se ha endurecido apreciablemente, perdiendo sus propiedades ligante, o bien que la mezcla asfáltica existente es de deficiente calidad, ya sea por un contenido de asfalto insuficiente, empleo de agregados sucios o muy absorbentes, como también por deficiencias durante la construcción, especialmente en tratamientos superficiales bituminosos.

3.4.5. Resistencia al deslizamiento:

Es la habilidad de una carpeta asfáltica, particularmente cuando esta mojada, de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos. Esto implica que el neumático debe mantenerse en contacto con las partículas del agregado y no sobre una película de agua en la superficie del pavimento, conocido como hidroplaneo. Una buena resistencia al deslizamiento lo contribuyen agregados con textura áspera y contenidos adecuados de asfalto. Los contenidos

altos de asfalto producen mezclas inestables las cuales tienden a deformarse y exudar, generando así, mayor deslizamiento.

3.4.6. Impermeabilidad:

Es la resistencia de una carpeta asfáltica al paso del aire y agua hacia su interior o a través de él. El contenido de vacíos puede ser una indicación a la susceptibilidad de una mezcla compactada al paso del agua y el aire.

CAUSAS	EFFECTOS EN LA CARPETA
Bajo contenido de asfalto	Las películas delgadas de asfalto causarán, tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en la carpeta asfáltica, causando oxidación y desintegración de la mezcla
Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en la carpeta asfáltica, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad.

Tabla 3.2 Causas y efectos de mezcla demasiado permeable, Tomada de Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

3.4.7. Trabajabilidad:

Es la facilidad con la cual una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. El asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad.

Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

3.5. MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL

3.5.1. Metodología:

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas asfálticas 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 y desarrollo un criterio de diseño de mezclas.

3.5.2. Propósito de la metodología:

El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 pulg) o menor. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

3.5.3. Descripción general:

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2.5 pulg) de espesor por 102 mm (4 pulg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y

compactar la mezcla asfáltica. Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

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), Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La Tabla 3.3 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D 3515.

3.5.4. Especificaciones de la metodología:

La característica más importante a evaluar en el diseño de una mezcla asfáltica en caliente es el porcentaje de vacíos en la mezcla, debido a que una mezcla se considera de buena calidad si su porcentaje de vacíos se encuentra entre 3% y 5% siendo este sus límites superior e inferior respectivamente. 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%. Todas las propiedades medidas y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas (Tabla 3.4). 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.

ABERTURA DE LOS TAMICES	MEZCLAS CERRADAS								
	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO								
	2 Pulg. (50mm)	1 ½ Pulg. (37.5mm)	1 Pulg. (25mm)	¾ Pulg. (19mm)	½ Pulg. (12.5mm)	⅜ Pulg. (9.5mm)	No 4 (4.75mm)	No 8 (2.36mm)	No 16 (1.18mm)
2 ½" Pulg. (63mm)	100	–	–	–	–	–	–	–	–
2" Pulg. (50mm)	90-100	100	–	–	–	–	–	–	–
1 ½" Pulg. (37.5mm)	–	90-100	100	–	–	–	–	–	–
1" Pulg. (25mm)	60-80	–	90-100	100	–	–	–	–	–
¾" Pulg. (19mm)	–	56-80	–	90-100	100	–	–	–	–
½" Pulg. (12.5mm)	35-65	–	56-80	–	90-100	100	–	–	–
⅜" Pulg. (9.5mm)	–	–	–	–	–	90-100	100	–	–
No 4 (4.75mm)	14-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85	80-100	–	–
No 8 (2.36mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67	65-100	–	100
No 16 (1.18mm)	–	–	–	–	–	–	40-80	–	95-100
No 30 (600µm)	–	–	–	–	–	–	35-65	–	70-95
No 50 (300 µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	–	45-75
No 100 (150 µm)	–	–	–	–	–	–	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

Tabla 3.3 Graduaciones Propuestas para Mezclas Cerrada
Fuente: ASTM D3515 Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures

CRITERIOS PARA MEZCLA DEL MÉTODO MARSHALL	TRANSITO LIVIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO MEDIANO CARPETA Y BASE		TRANSITO PESADO CARPETA Y BASE	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
Compactación, numero de golpes en cada cara de la probeta	35	35	50	50	75	75
Estabilidad N(lb)	336 (750)	-	5358 (1200)	-	8006 (1800)	-
Flujo, 0.25mm (0.01 pulg)	8	18	8	16	2	4
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% VMA	VER TABLA 3.5					
% VFA	70	80	65	78	65	75

Tabla 3.4 Criterios para el diseño de Mezclas por el Método Marshall Tomada de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

TAMAÑO MÁXIMO EN MM PORCENTAJE		VMA MÍNIMO, POR CIENTO		
		Vacíos de Diseño, por ciento		
mm	pulg	3.0	4.0	5.0
1.18	No 16	21	22.5	23.5
2.36	No 8	19	20	21
4.75	No 4	16	17	18
9.5	¾	14	15	16
12.5	½	13	14	15
19	¾	12	13	14
25	1	11	12	13
37.5	1.5	10	11	12
50	2	9.5	10.5	11.5
3	2.5	9.0	10	11

Tabla 3.5 Porcentaje Mínimo de VMA
Tomada de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS
22, Asphalt Institute

3.5.5. Evaluación y ajustes 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 las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado 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 graduación del agregado este 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,

rediseñar la mezcla. Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la graduación del los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones.

Las curvas granulométricas son de gran ayuda al hacer los ajustes necesarios en los diseños de mezclas. Por ejemplo, las curvas obtenidas de la ecuación de Densidad Máxima de Fuller (Figura 3.5) representan condiciones de densidad máxima y valores mínimos de vacíos en el agregado mineral (VMA). Las mezclas asfálticas que poseen dichas curvas presentan contenidos de vacío que pueden ser demasiado bajos. Generalmente, cualquier desviación de estas curvas resulta en densidades menores y valores más altos de VMA. La magnitud del cambio en la densidad y en el VMA depende de la cantidad de ajustes hechos en el contenido de agregado grueso o fino de la mezcla.

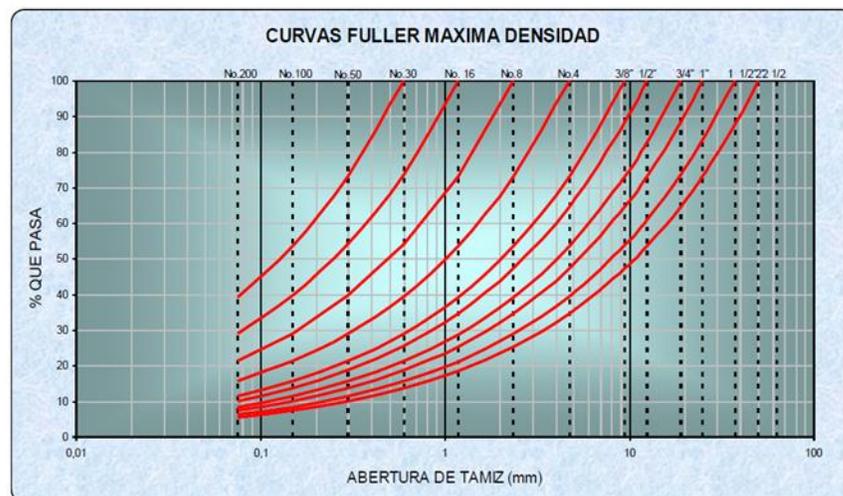


Figura 3.5 Gráfico Curvas Fuller de Máxima Densidad Basadas en un Gráfico Normalizado Semi-log de Granulometría. Tomada de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

La Figura 3.6 muestra curvas de densidad máxima dibujadas sobre un gráfico de granulometría de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) (USA) (basada en una escala donde las aberturas de los tamices se elevan a una potencia de 0.45).

Muchos diseñadores encuentran conveniente la gráfica del FHWA para hacer ajustes en la granulometría del agregado. Las curvas en la gráfica del FHWA pueden hallarse usando la ecuación de densidad máxima de Fuller, o dibujando una línea recta desde el origen, en la parte inferior izquierda de la gráfica, hasta el tamaño máximo nominal de partícula deseado, en la parte superior. Las granulometrías que se acercan a las líneas rectas tienen, generalmente, valores bajos de VMA, y deben ser ajustadas alejándolas de estas líneas. Dichos ajustes aumentan los valores de VMA, permitiendo así el uso de suficiente asfalto para poder obtener máxima durabilidad sin causar exudación en la mezcla.

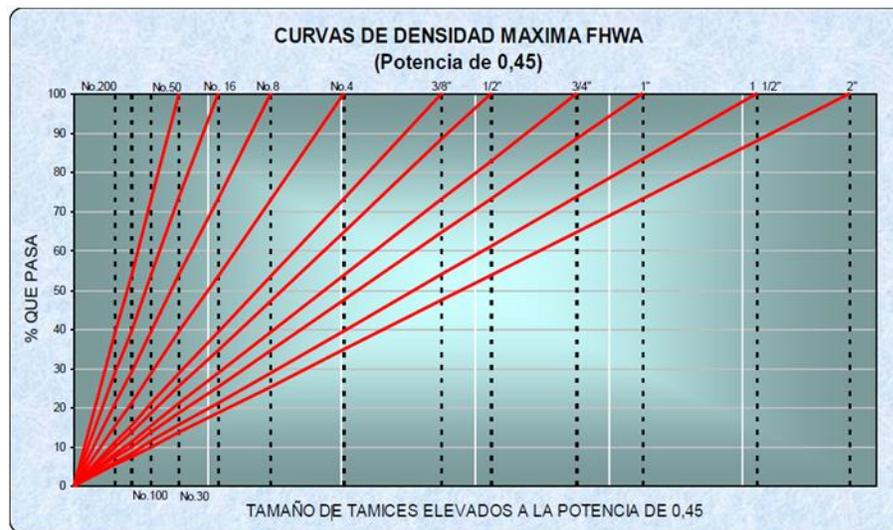


Figura 3.6 - Gráfico Curvas de Densidad Máxima Basadas en un Gráfico FHWA (potencia de 0.45) de Granulometría. Tomada de Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, MS 22, Asphalt Institute

3.5.5.1. Lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba

3.5.5.1.1. Bajo contenido de vacíos 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 graduación 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.

3.5.5.1.2. Bajo contenido de vacíos 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.

3.5.5.1.3. Contenido satisfactorio de vacíos y estabilidad baja

La baja estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado. Partículas de agregado con textura rugosa y superficies menos redondeadas, presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.

3.5.5.1.4. Contenido alto de vacíos y estabilidad satisfactoria

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través de la mezcla asfáltica 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.

3.5.5.1.5. 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.

3.5.6. Ensayos a la mezcla compactada

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas, la cuales son:

- Ensayo de la gravedad específica bulk
- Ensayo de la estabilidad y flujo
- Análisis de la densidad y vacíos en la mezcla

3.5.6.1. Determinación de la gravedad específica bulk

El ensayo de gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas utilizando especímenes saturados superficialmente secos puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado. Este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma AASHTO T 166-05, para la gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas usando especímenes cubiertos con parafina la norma AASHTO T 275 es aplicada. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se utiliza la norma AASHTO T 166-05, en caso contrario, se recurre a la norma AASHTO T 275.

3.5.6.2. Ensayo de estabilidad y flujo

El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla. Sumergir el espécimen en un baño María a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

Remueva el espécimen de ensayo del baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocar la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga. Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una velocidad constante de 50.8 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que el ensayo de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm (1/100) será el valor del flujo Marshall.

3.5.6.3. Análisis de densidad y vacíos

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

conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores. Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; 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).

3.6. DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS

3.6.1. Dosificación

La dosificación de agregados tiene por objeto lograr una mezcla cuya gradación se encuentre dentro de los límites recomendados en una especificación determinada, se cuenta con procedimientos analíticos y gráficos; dentro de estos el método de prueba y error es el más utilizado, ya que con la ayuda de programas de computación como Excel es muy fácil elaborar tablas de cálculos y establecer una combinación de varios agregados, por su puesto se debe tener la granulometría de cada agregado a ser combinado. Estos métodos son descritos a continuación acompañados de ejemplos para hacer más fácil su comprensión.

3.6.2. Método Analítico

3.6.2.1. Dosificación para dos agregados

La formula general básica para la combinación de agregados, sin importar el número de agregados o el método utilizado para establecer las proporciones, es la siguiente:

$$P = Gx_a + Fx_b + Mx_c \dots \dots \text{etc} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

P = es el porcentaje de material que pasa un tamiz dado para la combinación de agregados, **G, F, M, etc....**

G, F, M, etc....= porcentaje de material que pasa un tamiz dado para los agregados G,F,M, etc....

a, b, c, etc....= proporciones de agregados G, F, M, etc. Usadas en la combinación y cuyo total es 1.

El proceso de dosificación resulta relativamente simple cuando se trata de la mezcla de dos agregados; tal es el caso uno grueso y por consiguiente el otro fino, identificados como G y F respectivamente. Una primera aproximación se obtiene al calcular el porcentaje que se requiere del material fino (F) de forma tal que se cumpla con la media de la especificación para el tamiz No. 200.

Por lo tanto la Ecuación para dos agregados es:

$$P = Gx_a + Fx_b \quad \text{Ec. 2}$$

Debido a que:

$$a + b = 1 \quad \text{Ec. 3}$$

Sustituyendo y despejando b tenemos:

$$b = \frac{P-G}{F-G} \quad \text{Ec. 4}$$

También tenemos para a:

$$a = \frac{P-F}{G-F} \quad \text{Ec. 5}$$

Ejemplo 3.1

TAMIZ	% PASA							
	¼	½	¾	No 4	No 8	No 30	No 100	No 200
ESPECIFICACION	100	100/80	90 / 70	70 / 50	50/35	29/18	16/8	10/4
MEDIDA DE LA ESPECIFICACION	100	90	80	60	42.5	23.5	12	7
AGREGADO GRUPO G	100	87	75	58	35	17	8	2
ARENA FINA F	100	100	100	100	100	80	53	40

Tabla 3.6 Especificaciones y granulometría de los dos agregados a ser combinados

Si a = Cantidad de Material G requerido en la mezcla.

b = Cantidad del material F requerido en la mezcla.

Despejando Ec. 3 se tiene que:

$$a = 1 - b \quad \text{Ec. 6}$$

Sí: **P** = Media de la especificación para el tamiz designado.

G = Porcentaje que pasa el tamiz designado del material Grueso

F = Porcentaje que pasa el tamiz designado del material Fino

Se debe cumplir la Ec. 2:

$$P = Gx_a + Fx_b$$

Tomando el tamiz **No. 200**:

$$P = 7, G = 2 \text{ y } F = 40$$

Por lo tanto, utilizando la Ec. 4 tenemos:

$$b = \frac{P - G}{F - G}$$

$$b = \frac{7 - 2}{40 - 2}$$

b = 0.1315 ≈ 0.132 Sustituyendo b en Ec. 6 tenemos: **a = 0.868**

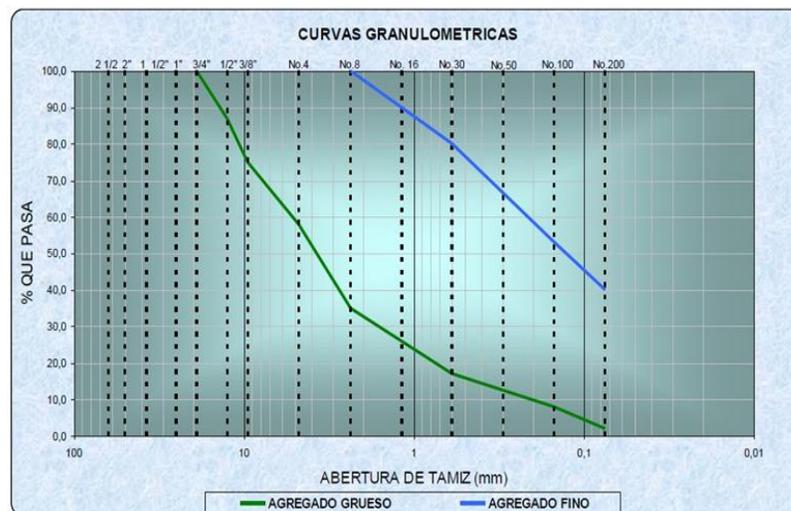


Figura 3.7 - Grafico Curva granulométrica. Agregado Grueso y Fino

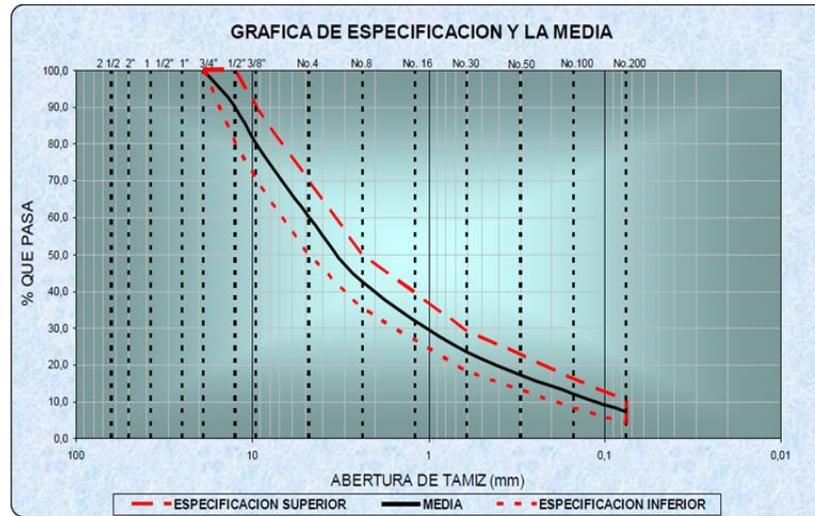


Figura 3.8 Grafica de la Especificación y la Media

La graduación final de la mezcla con estas dosificaciones será:

Tabla 3.7 Especificaciones y granulometría para los tres agregados. a ser combinados

TAMIZ	% PASA							
	¾	½	⅓	No 4	No 8	No 30	No 100	No 200
ESPECIFICACION	100	100/80	90 / 70	70 / 50	50/35	29/18	16/8	10/4
MEDIDA DE LA ESPECIFICACION	100	90	80	60	42.5	23.5	12	7
AGREGADO GRUPO G	86.8	75.5	65.1	53.8	30.4	14.8	6.9	1.7
ARENA FINA F	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	10.6	7.0	5.3
MEZCLA	100	88.7	78.3	63.5	43.6	25.4	13.9	7.0

Como se puede apreciar los resultados obtenidos se ajustan a los requerimientos de la especificación y por lo tanto se puede adoptar esta dosificación procediendo a graficar la mezcla ver Figura3.9.

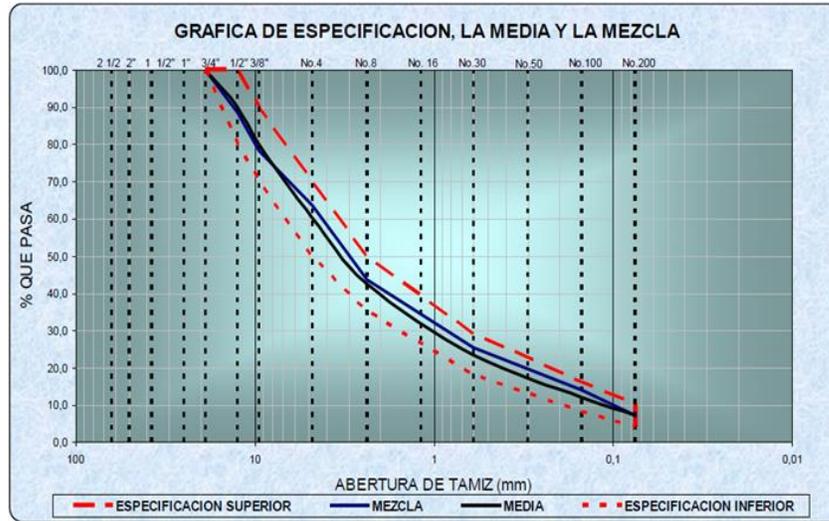


Figura 3.9. Grafica de Especificación, Promedio y Mezcla

3.6.2.2. Dosificación para tres agregados

Ejemplo 3.2

Se van a mezclar acopios de agregado grueso, fino y filler para cumplir con los requerimientos de gradación que se indican en la Tabla 3.6

TAMIZ	% PASA							
	¾	½	⅜	No 4	No 8	No 30	No 100	No 200
ESPECIFICACION	100	100/80	90 / 70	70 / 50	50/35	29/18	16/8	10/4
GRUESO G	100	85	58	29	2.4	0.5	0.3	0.1
FINO F	100	100	100	100	95	45	23	8.8
FILLER M	100	100	100	100	100	100	95	74

Tabla 3.8 Resultados de la combinación de los tres agregados a ser mezclados

La revisión de las gradaciones de cada uno de los materiales indica claramente una separación entre el agregado grueso y el fino a partir del tamiz N. 8, siendo la mayor proporción de la fracción inferior a este tamiz, aportada por el agregado fino. por lo que un primer ajuste de la mezcla se puede lograr estimando las proporciones de agregado grueso y fino requeridas para obtener 42,5% de material inferior al Tamiz N. 8 (% Pasa – media de la especificación). El porcentaje (a) de agregado grueso (G) para producir la cantidad deseada que pase un tamiz específico (en este caso el tamiz N. 8) puede calcularse de manera similar al tratamiento que se dio en el Ejemplo 3.1. Esta expresión es aplicable únicamente a la mezcla de 2 materiales.

En este caso, nuevamente:

G = Agregado grueso que pasa el tamiz designado, en %

F = Agregado fino que pasa el tamiz designado, en %

a = Cantidad de Material G requerido en la mezcla, en %

b = Cantidad del material F requerido en la mezcla, en %

P = Valor deseado que pasa el tamiz designado, (Media de la especificación), en %

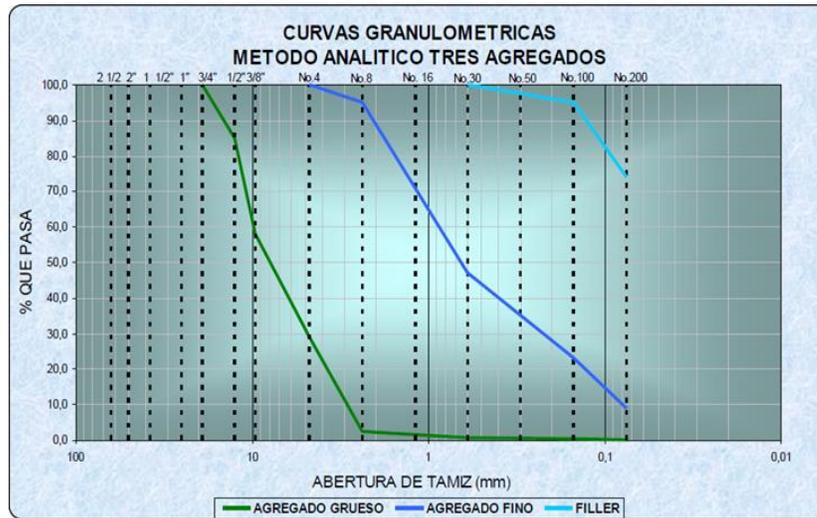


Figura 3.10. Curva granulométrica agregado Grueso, Medio y Fino

Por lo tanto, utilizando la Ec. 5 tenemos para la No. 8:

$$a = \frac{P - F}{G - F}$$

$$a = \frac{42.5 - 95}{2.4 - 95}$$

$$a = 0.566 \approx 0.57$$

Aplicando la Ecuación Ec. 2 para tres agregados tenemos:

$$P = Gxa + Fxb + Mxc \quad \text{Ec. 7}$$

Ampliando Ec. 3 para tres agregados tenemos:

$$\mathbf{a + b + c = 1} \qquad \mathbf{Ec. 8}$$

Despejando Ec. 3 obtenemos:

$$\begin{aligned} \mathbf{b} &= \mathbf{1 - a - c} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{1 - 0.566 - c} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{0.434 - c} \qquad \mathbf{Ec. 9} \end{aligned}$$

Sustituyendo en Ec. 7, analizando el tamiz No. 200:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \mathbf{Gx0.566 + Fxb + Mxc} \\ \mathbf{0.1x0.566 + 8.8x(0.434 - c) + 74xc} &= \mathbf{7} \\ \mathbf{c} &= \mathbf{0.0479 \approx 0.04} \end{aligned}$$

Sustituyendo en Ec. 9:

$$\begin{aligned} \mathbf{b} &= \mathbf{0.434 - c} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{0.434 - 0.04} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{0.394 = 0.39} \end{aligned}$$

La comprobación de esta dosificación se muestra en la siguiente tabla. Como se puede apreciar los resultados obtenidos en la **Tabla 3.7** se ajustan a los requerimientos de la especificación y por lo tanto se puede adoptar esta dosificación.

TAMIZ	% PASA							
	¼	½	¾	No 4	No 8	No 30	No 100	No 200
ESPECIFICACION	100	100/80	90 / 70	70 / 50	50/35	29/18	16/8	10/4
MEDIDA DE LA ESPECIFICACION	100	90	80	60	42.5	23.5	12	7
AGREGADO G 57%	57	48.4	33.1	16.5	14	0.3	0.2	0.1
FINO F 39%	39	39	39	39	37.1	18.3	9.0	3.4
FILLER M 4%	4	4	4	4	4	4	3.8	3
MEZCLA	100	91.4	76.1	59.5	42.4	22.6	13.0	6.5

Tabla 3.9 Resultados de la combinación de los tres agregados

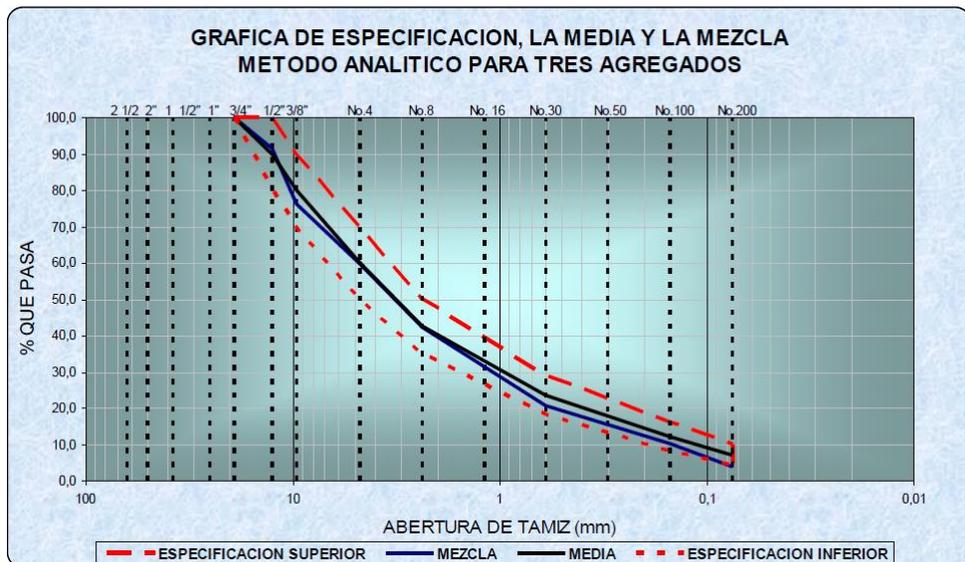


Figura 3.11 Grafica de Especificación, Promedio y Mezcla

3.7. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA EN CALIENTE UTILIZANDO EL MÉTODO MARSHALL

Una mezcla asfáltica se puede clasificar según su tamaño máximo nominal de agregado pétreo, por ejemplo mezcla de 1 pulg indica que su tamaño máximo es de una pulgada y que dicho material pasará por completo el tamiz de 1 pulg ó según su tamaño máximo nominal, que suele ser la más utilizada; por ejemplo una mezcla con designación de $\frac{3}{4}$ pulg implica que su agregado tiene un tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ pulg y todo el agregado pasará el tamiz de tres cuartos de pulgadas, el proceso que se explica seguidamente es para diseñar una mezcla densa. Un diseño de mezcla asfáltica en caliente es un proceso muy amplio y complementario en el cual intervienen varios factores de estudio, los cuales comprenden:

- Establecer la designación de la mezcla que se desea diseñar.
- Para esta investigación se elaborara un diseño de Mezcla asfáltica densa de TMN de $\frac{3}{4}$ " en base al tamaño máximo nominal del agregado.
- Elección de la especificación bajo la cual se regirá la granulometría, ésta dependerá del tamaño máximo nominal. La banda de control puede ser definida por el contratante, el diseñador ó ser tomado de las especificaciones vigentes en la región donde se realiza el diseño.
- Estudio de los materiales que conformarán la mezcla, los cuales básicamente los agregados pétreos y el asfalto.

El estudio de los materiales pétreos comprenderá una serie de ensayos para cada tipo de agregado que se utilice (las especificaciones de la SIECA, exigen no menos de tres agregados acopiados en la planta, cada uno con granulometría distinta), referente a agregados pétreos, todos los ensayos son muy importantes, pero el que más influye a la hora de realizar el diseño es el ensayo de análisis

granulométrico, ya que la granulometría que presentan las muestras de los diferentes agregados debe ser la que realmente tiene el agregado en bruto apilado en la planta, y ésta información es la que se utiliza para establecer una combinación de los diferentes agregados para que estos cumplan con una determinada especificación que está de acuerdo a la designación de la mezcla.

Si el resultado del análisis granulométrico de los diferentes agregados ó tan sólo de uno de es erróneo, y no es el que realmente presenta el material en bruto apilado, este resultado influirá grandemente a la hora de realizar el diseño. Por lo general nunca se acierta en el diseño a la primera vez, y por lo tanto, habrá que realizar correcciones las cuales se hacen en base a las dosificaciones de los agregados. Una vez que se conoce que los agregados cumplen con las especificaciones correspondientes y se tiene la granulometría de cada uno, así como la carta de viscosidad-temperatura del asfalto, se le da seguimiento al proceso de diseño.

- Establecimiento de las proporciones de los diferentes tamaños de agregados que intervendrán en el diseño, realizándose una combinación teórica, siendo esta calculada por un método adecuado de combinación, como los que se abordan en la sección 3.3 o un método por tanteos; y posteriormente la comprobación granulométrica.
- Ya establecidas las proporciones de cada agregado y las diferentes dosificaciones de asfalto que se utilizarán se sigue el procedimiento para iniciar el mezclado en laboratorio considerando las temperaturas de la carta de viscosidad-temperatura del asfalto.
- Después que se elaboran las briquetas se da seguimiento a lo que es esencia el método Marshall, el cual consiste en tres procedimientos: determinación del peso específico total, medición de la estabilidad y

fluencia y análisis de la densidad y el contenido de vacíos de las briquetas (éste análisis es enfocado hacia las cuatro características de la mezcla y su influencia en el comportamiento de la mezcla compactada: Densidad, vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral y contenido de asfalto).

- Por último y después de ciertas correcciones en las dosificaciones se logra establecer la fórmula de trabajo, la cual contiene las dosificaciones finales de cada agregado y el porcentaje de cemento asfáltico para que la planta reproduzca la mezcla.

3.7.1. Procedimiento para la combinación de agregados a utilizar en la mezcla asfáltica.

Realizados los ensayos de granulometría para cada una de las diferentes fracciones de tamaño de agregado que se utilizarán en el diseño (ver ANEXO 1.1, 1.2, 1.3). Se busca una combinación de los tres agregados: Grava de $\frac{3}{4}$ " , Grava $\frac{1}{2}$ " y Arena triturada, que cumpla especificaciones de la banda de control de granulometría tipo-C de la SIECA la cual está contemplada en la Tabla 3.11 y Tabla 3.12 para esto se ha utilizado el programa Excel de Windows mediante la elaboración de una tabla con fórmulas para que realice dichos cálculos de la cual se obtiene los porcentajes para cada uno de los agregados antes mencionados, y considerando que el Tamaño Máximo de agregado que se tiene es de $\frac{3}{4}$ " pulg, con las granulometrías corridas de cada uno de los agregados que conformarán la combinación, luego se procede a asignar un porcentaje a cada agregado(en la hoja de Windows Exel), la sumatoria de dichos porcentajes será el 100 por ciento de los agregados, se muestran los valores finales de cada uno de los agregados luego de haberlo realizado en dicha hoja electrónica hasta que los porcentajes mostrados entraran en la franja de control de la SIECA.

Grava	$\frac{3}{4}$ "	17 %
Grava	$\frac{1}{2}$ "	23 %
Arena		<u>60 %</u>
		100 % de la Combinación Granulométrica.

Con dichos porcentajes se procede a realizar una combinación real (comprobación granulométrica) de los tres agregados y luego en el laboratorio se desarrolla el ensayo de granulometría para verificar si la granulometría se reproduce, éste es un ensayo verdaderamente importante ya que es el que indica si la granulometría se puede producir al combinar los tres agregados en los porcentajes establecidos, si no se cumple la granulometría hay que buscar otros porcentajes de agregados que sí la cumpla.

		Constructora DISA S.A. de C.V.		MEZCLA DE AGREGADOS PÉTREOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE						
		Planta Asfáltica Quezaltepeque								
Agregados Pétreos										
No.	Nombre	G.E. Bulk	Porcentaje	Descripción	Procedencia					
1	Grava 3/4"									
2	Grava 1/2"									
3	Arena Triturada									
Mezcla de Agregados Pétreos										
Malla		Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arena Triturada	Mezcla de Agregados	SIECA 703-8 Graduación C		Tol.	Formula de Trabajo	
NOMBRE	mm	17.00 %	23.00 %	60.00 %	100.00 %	Mín.	Máx.		Mín.	Máx.
1"	25.00	100.0	100.0	100.0	100.0					
3/4"	19.00	99.23	100.00	100.0	99.9	100	100		97	100
1/2"	12.50	35.53	87.8	100.0	86.2	97	100	±5	81	91
3/8"	9.50	9.8	63.21	100.0	76.2			±6	70	82
No. 4	4.75	3.14	6.8	94.0	58.5			±7	51	65
No. 8	2.36	1.97	3.32	69.5	42.8			±5	37	47
No. 16	1.18	1.59	2.11	49.2	30.3				24	34
No. 30	0.60	1.34	1.50	34.3	21.1			±4	17	25
No. 50	0.30	1.10	1.18	22.7	14.1			±3	11	17
No. 100	0.15	0.85	0.95	14.6	9.1				5	12
No. 200	0.075	0.57	1.0	9.1	5.8	3	8	±2	4	8

Tabla 3.10 Granulometría combinada de los agregados a utilizar en el diseño de la mezcla.
 Fuente: Presentación de los autores

TAMIZ		Porcentaje de masa pasando, Designación de Tamices (AASHTO T 27 y AASHTO T 11)					
		Designación de la Graduación					
		A	B	C	D	E	F
37.5mm	1½ pulg.	100					
25 mm	1 pulg.	97-100	100	100			
19 mm	¾ pulg.	-	97-100	97-100	100	100	
12.5 mm	½ pulg.	-	76-88(5)	*(5)	97-100	97-100	
9.5 mm	⅜ pulg.	53-70(6)	-	*(6)	-	*(5)	100
4.75 mm	No 4	40-52(6)	49-59(7)	*(7)	57-69(6)	*(6)	33-47(6)
2.36 mm	No 8	25-39(4)	36-45(5)	*(5)	41-69(6)	*(6)	7-13(4)
600µ	No 30	12-22(4)	20-28(4)	*(4)	22-30(4)	*(4)	-
300 µ	No 50	18-16(3)	13-21(3)	*(3)	13-21(3)	*(3)	-
74 µ	No 200	3-8(2)	3-7(2)	3-8(2)	2-8(2)	3-8(2)	2-4(2)

Tabla 3.11 *El contratante especifica el valor del rango y límites (±) Desviación permisible
Fuente: Manual Centroamericano "Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales (SIECA)

TAMIZ		Porcentaje de masa pasando, Designación de Tamices (AASHTO T 27 y AASHTO T 11)					
		Designación de la Graduación					
		A	B	C	D	E	F
37.5mm	1½ pulg.	100					
25 mm	1 pulg.	97-100	100	100			
19 mm	¾ pulg.	-	97-100	97-100	100	100	
12.5 mm	½ pulg.	-	76-88(5)	81-91	97-100	97-100	
9.5 mm	⅜ pulg.	53-70(6)	-	70-82	-	*(5)	100
4.75 mm	No 4	40-52(6)	49-59(7)	51-65	57-69(6)	*(6)	33-47(6)
2.36 mm	No 8	25-39(4)	36-45(5)	38-48	41-69(6)	*(6)	7-13(4)
600µ	No 30	12-22(4)	20-28(4)	17-25	22-30(4)	*(4)	-
300 µ	No 50	18-16(3)	13-21(3)	11-17	13-21(3)	*(3)	-
74 µ	No 200	3-8(2)	3-7(2)	4-8	2-8(2)	3-8(2)	2-4(2)

Tabla 3.12- Tabla con datos de la banda C especificados,*El contratante especifica el valor del rango y límites (±) Desviación permisible, Fuente: Manuel Centroamericano Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales (SIECA).

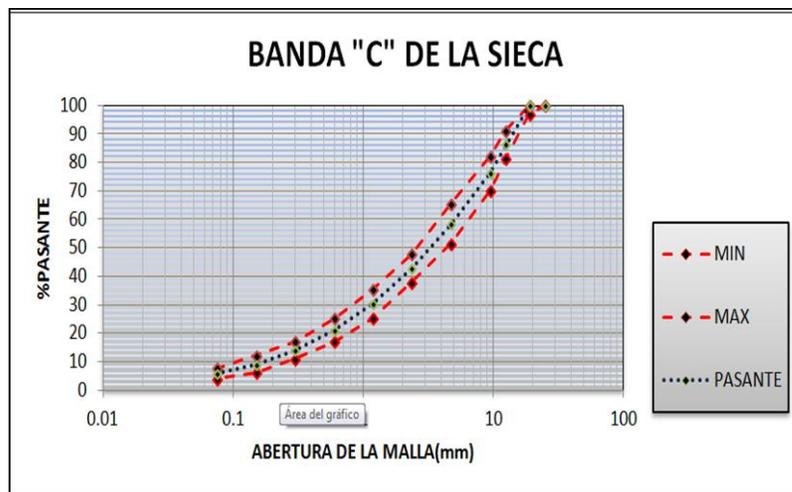


Figura 3.12 Gráfico de Comprobación granulométrica de la combinación de los tres agregados con su banda de control, Fuente: Presentación de los autores

3.7.2. Dosificación de agregados para la mezcla

El procedimiento para dosificación de agregado que se utilizará en el método de diseño que se explica en este documento es el que recomienda la norma AASHTO T 245, que es la que rige el procedimiento de elaboración de las briquetas por el Método Marshall para luego ser ensayadas para la Resistencia a la Estabilidad y Flujo los agregados deben separarse por tamizado seco en ciertas fracciones y recomienda los rangos. Según el tamaño máximo de los agregados ($\frac{3}{4}$ ") que se utilizan en el diseño, se toman las siguientes fracciones de tamaño:

- 19.0 mm a 9.5 mm ($\frac{3}{4}$ a $\frac{3}{8}$ pulg.)
- 9.5 mm a 4.75 mm ($\frac{3}{8}$ pulg a No. 4)
- 4.75 mm a 2.36 mm (No. 4 a No. 8)
- Pasa 2.36 mm (No. 8)

Nuestro diseño utilizará tres tamaños de agregado con sus respectivos porcentajes establecidos en la Sección 3.8 que son: Agregado Grava $\frac{3}{4}$ "(17 %), Agregado Grava $\frac{1}{2}$ "(23 %) y Arena (60%); pero ahora, para poder hacer una briqueta de 1200 gr. se tienen cuatro fracciones de agregado, lo cual implica que se deben pesar cuatro cantidades, una de cada fracción para complementar una dosificación de agregado para una bachada (elaboración de una briqueta), $\frac{3}{4}$ pulg a $\frac{3}{8}$ pulg significa que se tiene una fracción de agregado que pasa la malla de $\frac{3}{4}$ pulg y se retiene en la malla de $\frac{3}{8}$ pulg, el porcentaje para las diferentes fracciones de agregados se puede calcular de dos formas:

La primera sumando los valores retenidos desde la malla de $\frac{3}{4}$ pulg. hasta la de $\frac{3}{8}$ pugl. los cuales son:

$$\frac{3}{4}'' = 0, \frac{1}{2}'' = 16.6 \text{ y } \frac{3}{8}'' = 10.5 \rightarrow \text{Suma} = 0 + 16.6 + 10.6 = 27.2 \%$$

La segunda forma es restando los porcentajes acumulados que pasan entre las mallas en las que se encuentra dicha fracción, por ejemplo:

$$\text{Pasa malla } \frac{3}{4}'' - \text{pasa malla } \frac{3}{8}'' = 100 - 72.8 = 27.2 \% \text{ y así sucesivamente.}$$

En la Tabla 3.13 se presentan los valores de los porcentajes de las cuatro fracciones de agregado que se utilizarán para obtener la dosificación de cada fracción de agregado.

PASA EL TAMIZ	SE RETIENE EN EL TAMIZ	OPERACIÓN	% DE LA FRACCIÓN
$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{8}$	100 - 76.2	23.8
$\frac{3}{8}$	No 4	76.2 - 58.5	17.7
No 4	No 8	58.5 - 42.8	15.7
Pasa la malla No 8		42.8	42.8

Tabla 3.13 Porcentajes calculados para cada fracción de agregados a utilizar en la mezcla, Fuente: Presentación de los autores

Con los porcentajes de las fracciones de agregado se procede a calcular el posible porcentaje óptimo de asfalto con la relación propuesta por el Instituto del Asfalto.

3.7.3. Estimación del porcentaje óptimo de asfalto

La estimación del porcentaje óptimo de asfalto es de una gran ayuda, y se realiza utilizando la relación propuesta por el instituto del asfalto, ya que proporciona un valor de asfalto óptimo teórico y a partir de este se establecen los demás porcentajes de asfalto para el diseño.

Relación propuesta por el Instituto del Asfalto:

$$P = 0.032a + 0.045b + Kc + n$$

Dónde:

P = Porcentaje de asfalto estimado por peso total de la mezcla

a = Porcentaje de material pétreo retenido en el tamiz No. 10.

b = Porcentaje de material que pasa el tamiz No. 10 y se retiene en la No. 200.

c = Porcentaje de material que pasa la malla No. 200.

K = Factor que depende del valor de "c", así:

c	K
11-15	0.20
6-10	0.18
c < 5	0.15

Tabla 3.14 Factores "c" y "K" Para calculo de contenido de asfalto

n = varía según el tipo de material pétreo y su absorción, así:

Tipo de Material	n
Gravas o arenas de río de baja absorción	0.55
Gravas angulosas, redondeadas, trituradas de baja absorción	0.65
Gravas angulosas o redondeadas de alta absorción y roca triturada de absorción media	0.70
Rocas trituradas de alta absorción	0.80

Tabla 3.15 Variación del coeficiente "n" según el tipo de material

Calculando "a", "b", "c" así:

$$P = 0.032a + 0.045b + Kc + n$$

Interpolando para encontrar el valor de "a":

$$\begin{array}{r} 8 \text{ ----- } 60.49 \\ 10 \text{ ----- } x \\ 16 \text{ ----- } 72.095 \end{array}$$

Se tiene:

$$x = \frac{72.095 - 60.499}{16 - 8}$$

$$a = 63.398$$

Calculando valor de "b":

Interpolando:

8	-----	39.501
10	-----	x
16	-----	27.905

$$x = \frac{27.095 - 39.501}{16 - 8}$$

$$\mathbf{b = 36.60}$$

Para "c" se tiene el valor del porcentaje que pasa la malla No 200:

$$\mathbf{c = 5.321}$$

Para los valores de "K" y "n" se tienen:

Para "K" el valor se busca en la tabla 3.14

$$\mathbf{K = 0.18}$$

Para "n" en tabla 3.15:

$$\mathbf{n = 0.60}$$

Sustituyendo en formula se tiene:

$$\mathbf{P = 0.032(63.398) + 0.045(36.60) + (0.18 * 5.321) + 0.60}$$

$$\mathbf{P = 5.23\% \text{ Se aproxima a:}}$$

P = 5.5% de Cemento Asfáltico

Los porcentajes de cemento asfáltico para cada dosificación se obtienen haciendo incrementos de 0.5% al porcentaje óptimo de cemento asfáltico, dos incrementos arriba y dos abajo de 5.5%, por lo tanto los porcentajes de cemento asfáltico a utilizar para elaborar las diferentes dosificaciones (bachadas) son:

4.5 %, 5.0 %, 5.5 %, 6.0 % y 6.5 %

Para cada porcentaje de cemento asfáltico se elaborarán tres briquetas como mínimo, cada briketa tendrá un peso de aproximadamente 1,200. gr, además, también se dosificará una o dos porciones de mezcla asfáltica de aproximadamente 2,500. gr. cada una, para gravedad específica teórica máxima, la cual se deberá dejar en condición suelta. La elección de hacer una o dos muestras para teórica máxima depende de los criterios del diseñador, ya que algunos hablan de inclusive hacer tres para tener un mejor valor promedio, ya que con dos muestras ensayadas no se tiene una certeza de que valores pueden ser tomados como los más exactos. Una vez establecidos los porcentajes de cemento asfáltico para cada dosificación se procede a calcular los pesos de los agregados para cada una de las fracciones de agregados y el peso de asfalto, dicho proceso se explica en la sección siguiente.

3.7.4. Procedimiento para calcular la dosificación de agregado y asfalto para la mezcla

A continuación se ejemplifica el cálculo de los diferentes pesos de agregados para cada una de las fracciones que componen la mezcla, de acuerdo a los porcentajes establecidos en la sección 3.7.1 página 79 y el peso del asfalto para la elaboración de una briketa, una muestra para gravedad específica teórica máxima.

3.7.4.1. Calculo para una briqueta

Para ejemplificar el cálculo se utilizará el porcentaje de 4.5% de C.A. (Cemento Asfáltico).

$$\begin{aligned} W_{\text{briqueta}} &= 1,200.0 \text{ g} \\ 1200 \text{ gr.} &\rightarrow 1200 \times 4.5\% = 54 \text{ gr. de C.A.} \\ &1200 \times \frac{95.5\%}{100\%} = \underline{1146 \text{ gr.}} \text{ de agregado} \\ &1200 \text{ gr.} \rightarrow \text{Peso total de la muestra} \end{aligned}$$

3.7.4.2. Calculo para una muestra para teórica máxima

Para ejemplificar el cálculo se utilizará el porcentaje de 4.5% de C.A. (Cemento Asfáltico).

$$\begin{aligned} W_{\text{muestra}} &= 2500 \text{ gr.} \\ 2500 \text{ gr.} &\rightarrow 2500 \times 4.5\% = 112.5 \text{ gr. de C.A.} \\ &2500 \times \frac{95.5\%}{100\%} = \underline{2387.5} \text{ gr. de agregado} \\ &2500 \text{ gr.} \rightarrow \text{Peso total de la muestra} \end{aligned}$$

3.7.4.3. Cálculos para las dosificaciones para teóricas máximas y briquetas

Para ahorrar tiempo existe una manera más sencilla de calcular los valores de cada fracción de agregado y de Cemento Asfáltico para cada punto a evaluar y que es igual de efectiva; es decir se puede sumar el valor de cada muestra de cada ensayo a realizar tales como: Gravedad específica máxima teórica y elaboración de briquetas (se deben tomar en cuenta por lo menos 3 briquetas por

punto evaluado) y elaborar una sumatoria total de cada fracción para una sola bachada para el punto a evaluar así.

Tomando en cuenta la cantidad de material por tipo de agregado **ver tabla 3.15** se tiene:

CANTIDAD DE MATERIAL POR TIPO DE AGREGADO	
GRAVA $\frac{3}{4}$	17.00%
GRAVA $\frac{1}{2}$	23.00%
ARENA TRITURADA	60.00%
Σ	100%

Tabla 3.16 Cantidad de Material por tipo de Agregado

Para cada punto a evaluar se toman:

4 Briquetas $1200 \times 4 = 4800\text{gr.}$
 2 Teórica Máximas $2500 \times 2 = \underline{5000\text{gr.}}$
 9800 gr.

NOTA: Se toma una briqueta extra por si en alguna de las 3 se duda de los datos obtenidos, al igual q una teórica máxima extra por si ocurre algo a la hora de realizar el ensayo datos erróneos u otro suceso que lleve a realizar el ensayo de nuevo.

De acuerdo a los pesos de cada agregado se calculan las proporciones de cada fracción de la mezcla las cuales se presentan en la tabla 3.17.

RESUMEN							
%ASFALTO	PESO TOTAL DE LA MUESTRA	ASFALTO gr.	PESO DEL AGREGADO	RETENIDO TOTAL 3/4	RETENIDO TOTAL 1/2	ARENA ECON	COMPROBACION
4.5%	5644.80 gr	9800.0 gr	9359.00 gr	1591.03 gr	2152.57 gr	5615.40 gr	9800.00 gr
5.0%	9800.00 gr	490.00 gr	9310.00 gr	1582.70 gr	2141.30 gr	5586.00 gr	9800.00 gr
5.5%	9800.00 gr	539.00 gr	9261.00 gr	1574.37 gr	2130.03 gr	5556.60 gr	9800.00 gr
6.0%	9800.00 gr	588.00 gr	9212.00 gr	1566.04 gr	2118.76 gr	5527.20 gr	9800.00 gr
6.5%	9800.00 gr	637.00 gr	9163.00 gr	1557.71 gr	2107.49 gr	5497.80 gr	9800.00 gr
4.0%	9800.00 gr	392.00 gr	9408.00 gr	1599.36 gr	2163.84 gr	5644.8 gr	9800.00 gr

Tabla 3.17 Resumen con los datos calculados para cada punto a evaluar, Fuente: Presentación de los autores

Esta es una manera mucho más efectiva de calcular la dosificación de cada uno de los agregados a utilizar en el diseño, para evitar realizar un cálculo de la dosificación de los agregados, para cada ensayo. Lo más recomendado para realizar este procedimiento es utilizar la herramienta Excel de Microsoft identificando adecuadamente con el nombre de cada uno de los agregados que intervienen en la mezcla, la cantidad de puntos que se desea evaluar, el peso de la muestra a ensayar y cada uno de los porcentaje de los agregado obtenidos en la fórmula de trabajo, luego se puede colocar una casilla en donde se compruebe que la sumatoria de los porcentaje de cada agregado que intervienen en la mezcla es igual a la muestra a ensayar, como se ejemplifica en la tabla 3.17, lo cual ayuda a obtener la dosificación completa para todos los ensayos.

3.8. TRABAJO DE LABORATORIO PARA EL DISEÑO DE LA MEZCLA

En la dosificación que se realizó para las proporciones de agregado son: Agregado grueso $\frac{3}{4}$ " 17%, agregado intermedio $\frac{1}{2}$ " 23% y arena y filler 60%, con los porcentajes de las fracciones de la Tabla 3.13 y utilizando de acuerdo al tamaño máximo nominal de la combinación de agregados que es de $\frac{3}{4}$ pulgada, la especificación granulométrica para ese tamaño máximo nominal, según Tabla 3.3 que se puede apreciar en la sección 3.5.4.

Para la elaboración de la mezcla asfáltica para cada punto del diseño se procede de la siguiente manera, donde se obtiene el material seco y pesado de cada una de las proporciones de agregado que se utilizaran en la elaboración de la mezcla del punto con su respectivo porcentaje de asfalto (ver figura 3.13).



FIGURA 3.13 Material seco y pesado de cada una de las proporciones de agregado que se utilizaran en la elaboración de la mezcla.

Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

Se pesa la tara que es una olla donde se pondrá a calentar el agregado en una cocina a gas, hasta llegar a una temperatura de mezclado, que para este diseño en particular es de 170°C y se colocó el asfalto AC-30 en un recipiente y se calentó en una cocina a gas hasta que llegó a una temperatura de 150°C , que es la temperatura de mezclado del asfalto; cuando el agregado y el asfalto se

encuentran a temperatura de mezclado se procedió a pesar nuevamente el agregado por los finos que se hayan perdido en el proceso de calentamiento y se cabalea, hasta llegar al peso requerido para la elaboración de la mezcla. (ver figura 3.14 y figura 3.15).



FIGURA 3.14 – Calentamiento previo de agregados y asfalto Chequeo de temperaturas para mezclado Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad



FIGURA 3.15 Cabaleo de pesos Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

El paso siguiente es pesar el asfalto, esto se hace sumando los dos pesos el de asfalto y el del agregado, luego se hace un cono estilo volcán en el agregado y se va colocando el asfalto por tanteos de manera de llegar al porcentaje de asfalto en peso del punto que se está evaluando.

Luego de haber pesado el asfalto y el agregado con sus respectivas temperaturas de mezclado, se procedió al mezclado colocando la olla con su contenido en la cocina a gas y con un espátula se mezclaron, de manera que todas las partículas de agregado se encuentren cubiertas de asfalto (ver figura 3.16).

Este proceso debe realizarse en dos minutos como máximo, obteniendo así la mezcla para evaluar el punto (ver figura 3.17).



FIGURA 3.16 Mezclado de agregado y asfalto, Mezcla asfáltica elaborada
Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

Después de elaboración de la mezcla se deja enfriar hasta una temperatura soportable al tacto, para que por medio del método de cuarteo o reducción de la muestra a tamaño de ensayo basado en la norma ASTM C-702-98(2003) se obtengan los pesos de la muestra para la elaboración de las briquetas y del ensayo de la gravedad máxima teórica (ver figura 3.17).



**FIGURA 3.17 Cuarteo de la mezcla asfáltica:
Procedimiento de Cuarteo,
Fracciones resultantes al final del cuarteo.**

Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad.



**FIGURA 3.18 Calentado de equipo de compactación:
Calentamiento en cocina de martillo de compactación y espátulas,
Moldes de compactación previo a calentamiento en horno.**

Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

COMPACTACIÓN DE ESPECÍMENES:

Se limpió totalmente el molde ensamblado para cada briqueta y la superficie del martillo de compactación y se calentaron en un horno eléctrico los moldes y la mezcla con su peso respectivo para cada briqueta (1,200g) hasta que está alcanzara una temperatura aproximada de 155°C para lo cual se supervisaba esta con un termómetro electrónico que media temperatura en grados °F y grados °C, calentando con anticipación el martillo en una cocina a gas, cuando la mezcla alcanza los 155°C se saca del horno y la vez se sacó del horno el molde ya calentado al cual se le introduce una pieza de papel filtro en el fondo del mismo antes de introducir la mezcla, luego Introduce la cantidad dosificada (bachada) completa en el molde, acomodando o varillando vigorosamente con una espátula caliente 15 veces alrededor del perímetro del molde con la mezcla y 10 veces en el interior según la norma, posteriormente se le colocó un termómetro para verificar su temperatura de manera tal que este pueda ser compactado a un temperatura de 146°C según la metodología y el tipo de asfalto, ya que el asfalto utilizado para este diseño es asfalto AC-30 y su temperatura de compactación es de 142°C como mínimo y de 148°C su máximo.

Al alcanzar la temperatura de compactación se colocó el molde en el collarín, ya con el molde ensamblado en el sujetador de molde en el pedestal de compactación se ejerció 75 golpes de forma manual con el martillo de compactación con caída libre 18 pulg (ver Figura 3.19) estos goles se trataron de darse de forma constante hasta llegar a su número o cantidad indicada de 75 golpes por lado. Después se colocó el molde en una posición inversa para dar el mismo número de golpes de compactación a la cara del espécimen que se invirtió.



FIGURA 3.19 Colocación de la mezcla en el molde de compactación y compactación manual de la mezcla.

Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad



FIGURA 3.20 Verificación de temperatura de compactación, Chequeo de temperatura previo a compactar, Momento que la temperatura llega al valor esperado.

Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad



FIGURA 3.21 Curado de briquetas.

Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

Después de elaborar las briquetas se realiza el trabajo de laboratorio comprendido en el procedimiento Marshall que comprende los siguientes ensayos, que se resumen como:

- Estabilidad y Flujo, AASHTO T 245-97 (2004)
- Gravedad Específica Teórica Máxima, AASHTO T 209 -05
- Gravedad Específica Bulk, AASHTO T 166-05

La densidad bulk debe obtenerse antes de la estabilidad, ya que éste es un ensayo destructivo, de la bulk y teórica máxima se obtiene el porcentaje de vacíos de cada bachada.

Como ensayos extras se realizaron los siguientes:

- Extracción cuantitativa d asfalto en mezclas bituminosas ASTM-2172-05

➤ Análisis Granulométrico del Agregado Extraído, AASHTO T 30-93 (2003)

Los ensayos de extracción de asfalto y análisis granulométrico de agregado extraído fueron realizados solo al punto con el contenido óptimo de asfalto.

Estos dos ensayos sirven para el control de mezclas asfálticas tanto en planta como en campo; pero además pueden ser utilizados durante el diseño de mezcla ya que su importancia se fundamenta en lo siguiente: sirven como ayuda extra para verificar que las dosificaciones de agregado y asfalto se cumplen en el procedimiento de diseño de mezcla en el laboratorio antes de realizar una bachada de planta, ya que entre más seguro se este que la dosificación de diseño es reproducible, da mayor confianza y certeza, para esperar una buena reproducibilidad del diseño cuando se produzca la bachada de planta. Lo que se busca es que la planta reproduzca el diseño establecido, por lo tanto se espera que, la producción de planta se ajuste al diseño de laboratorio y no ajustar el diseño a la producción de la planta.

Además la extracción de asfalto sirve para tener una idea previa, de que se cumple la tolerancia de asfalto ($\pm 0.5\%$) respecto a una dosificación específica de cada bachada para los diferentes puntos de dosificación durante el proceso de diseño en el laboratorio, además la granulometría que se hace al agregado extraído, es útil para establecer una banda de control de agregados (especificación granulométrica).

3.8.1. Gravedad específica BULK (AASHTO T 166-00).

Después de la compactación de las briquetas y su posterior extracción de los moldes para su respectivo curado a temperatura ambiente, se procede a realizar el ensayo de la gravedad bulk, según AASHTO T 166-05.

El procedimiento seguido fue secar los especímenes hasta masa constante (curado a temperatura ambiente)(ver figura 3.21). Luego se registro la peso seco de cada briketa (ver Figura 3.22). Luego se sumergieron en un recipiente con agua a 25 °C, dejándolos saturar por lo menos 10 minutos. Al final del período de 10 minutos se removieron los especímenes y se colocaron en la canastilla sumergida previamente agitada para la eliminación de burbujas de aire, y se registro el peso sumergido de cada briketa (ver Figura 3.23), inmediatamente al retirar la briketa de la canastilla se seco la humedad del espécimen con una toalla húmeda tan rápido como fue posible (ver figura 3.24). Pesamos al espécimen y registramos como peso saturado superficialmente seco.



FIGURA 3.22 Peso seco de Briketa.

Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

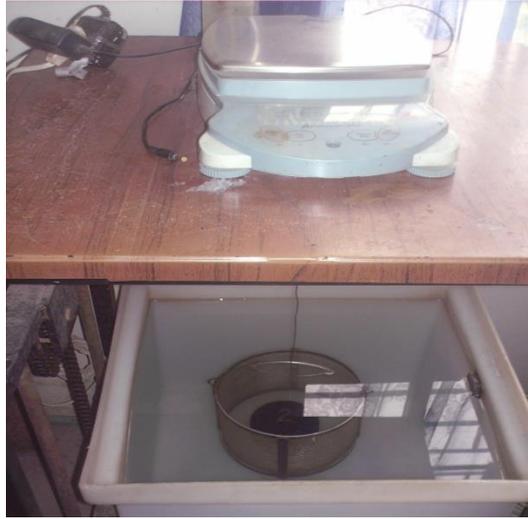


FIGURA 3.23 Peso sumergido de Briqueta
Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad



FIGURA 3.24 Peso superficialmente seco de cada Briqueta
Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

La norma AASHTO T 166-00 establece que la diferencia máxima permitida entre dos valores de gravedad específica bulk es de 0.02, para que puedan ser

promediados, aquella gravedad bulk que sobrepasa dicho valor es descartada. La Tabla 3.18 contiene los datos obtenidos de ensayo necesarios para calcular la gravedad específica bulk de cada bachada.

% CEMENTO ASFÁLTICO		4.0%			4.5%			5.0%		
N° DE PROBETA		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Gravedad Específica BULK	$W_{Al\ Aire}$	1147.1	1146.7	1138.4	1154.0	1152.6	1155.1	1155.4	1151.2	1149.6
	W_{SSS}	1151.1	1151.0	1143.0	1157.1	1156.2	1157.4	1157.9	1154.2	1151.1
	$W_{sumergido}$	650.2	654.1	648.9	660.5	656.5	659.6	662.0	660.8	660.6
	$V_{Probeta}$	500.9	496.9	494.1	496.6	499.7	497.7	495.9	493.5	490.5
	Densidad Probeta	2.290	2.308	2.304	2.324	2.307	2.321	2.330	2.333	2.344
	Densidad Media	2.301			2.317			2.336		
	% CEMENTO ASFÁLTICO	5.5%			6.0%					
	N° DE PROBETA	1	2	3	1	2	3			
	$W_{Al\ Aire}$	1145.08	1150.78	1145.71	1151.83	1150.31	1153.01			
	W_{SSS}	1145.11	1151.14	1146.46	1152.16	1150.74	1153.27			
	$W_{sumergido}$	662.21	662.54	664.29	669.22	669.4	668.68			
	$V_{Probeta}$	482.9	488.6	482.2	482.9	481.3	484.6			
	Densidad Probeta	2.371	2.355	2.376	2.385	2.390	2.379			
	Densidad Media	2.368			2.385					

Tabla 3.18 Resumen del cálculo de la Gravedad Específica Bulk, Fuente: Presentación de los autores

Ejemplo de cálculo de Gravedad Específica Bulk para el punto de 4.0 % de Asfalto.

$$G_{mb} = \frac{W_{MUESTRA}}{W_{SSS} - W_{SUMERGIDO}}$$

BRIQUETA	1	2	3
$W_{Al\ Aire}$	1,147.1	1,146.7	1,138.4
W_{SSS}	1,151.1	1,151.0	1,143.0
$W_{sumergido}$	650.2	654.1	648.9

$$G_{mb1} = \frac{1147.1}{1151.1 - 650.2} = 2.29$$

$$G_{mb2} = \frac{1146.1}{1151.0 - 654.1} = 2.308$$

$$G_{mb3} = \frac{1138.4}{1143.0 - 648.9} = 2.304$$

Valor Promedio:

$$\frac{G_{mb1} + G_{mb2} + G_{mb3}}{3} = 2.301$$

3.8.2. Gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209 -05).

La gravedad específica teórica máxima (G_{mm}), como su nombre lo dice es la máxima densidad que puede presentar una mezcla asfáltica, ya que no considera vacíos en la muestra por estar esta en condición suelta, simplemente es la densidad de sólo las partículas de agregado recubiertas por el asfalto; es complementaria de la gravedad específica bulk, ya que con los valores de dichas gravedades se obtiene el porcentaje de vacíos ($\%P_a$), la Tabla 3.19 es un resumen de los valores para calcular la teórica máxima.

El procedimiento realizado fue que una muestra de masa mínima de 2500 gramos secada en horno en condición suelta es colocada en un contenedor de vacío (picnómetro, ver Figura 3.25) tarado. Se agrega suficiente agua a una temperatura de 25 ± 0.5 °C (77 ± 0.9 °F) hasta sumergir completamente la muestra aproximadamente que el agua suba 1 pulgada. Luego le es aplicado vacío por 15 ± 2 min para reducir gradualmente la presión residual en el picnómetro a 3.7 ± 0.3 kPa (27.5 ± 2.5 mm Hg), a la vez se está aplicado agitación mediante un equipo de vibrado mecánico (ver Figura 3.26). Al final del período de vacío, el vacío es gradualmente liberado. El volumen de la muestra de mezcla asfáltica se obtiene llenando el picnómetro completamente de agua y pesándolo en el aire (ver Figura 3.25). En el tiempo de pesado, la temperatura es medida así como también la masa. De las mediciones de masa y volumen, la gravedad específica o densidad a 25 °C (77 °F) es calculada.

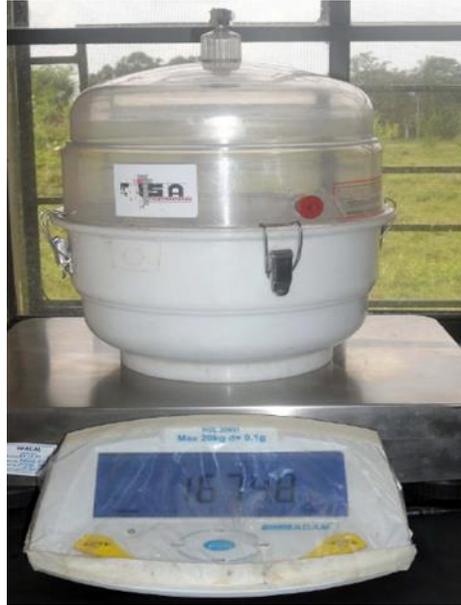


FIGURA 3.25 Picnómetro Teórica Máxima

Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad



**FIGURA 3.26 Equipo teórica máxima:
Equipo para generar vacío
Agitador Mecánico**

Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad.



FIGURA 3.27 Equipo de vacío, vibrado, picnómetro y manómetro ensamblado.
 Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

Gravedad Específica Teórica Máxima					
W inicial	2,597.40	2,578.60	2,597.70	2,646.40	2,651.50
W Picnómetro + Agua	11,754.80	11,754.80	11,754.80	11,754.80	11,754.80
W Antes del Ensayo	14,352.20	14,333.40	14,352.50	14,401.20	14,406.30
W Después del Ensayo	13,306.80	13,291.50	13,288.70	13,315.60	13,306.60
W antes - W Después	1,045.40	1,041.90	1,063.80	1,085.60	1,099.70
G.E. Teórica Máxima	2.485	2.475	2.442	2.438	2.411

TABLA 3.19 Resumen del cálculo de la Gravedad Teórica Máxima, Fuente: Presentación de los autores.

Ejemplo de cálculo para el punto de contenido de asfalto de 4.0%:

$$G_{mm} = \frac{W_{MUESTRA}}{W_{MUESTRA} + W_{PICNOMETRO+AGUA} + W_{DESPUES DEL ENSAYO}}$$

$$W_{MUESTRA} = 2597.40$$

$$W_{PICNOMETRO+AGUA} = 11,754.80$$

$$W_{DESPUES DEL ENSAYO} = 13,306.80$$

$$G_{mm} = 2.485$$

3.8.3. Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el equipo Marshall, AASHTO T-245-97

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente (inmediatamente deja de registrar carga). Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, las quijadas (cabezales) superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador dial. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.

Debido a que la estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla asfáltica a la deformación; sin embargo en las mezclas asfálticas no siempre se aplica que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mejor. El valor de la fluencia Marshall, medida en centésimas de pulgada, representa la deformación de la briqueta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro de la briqueta.

El método de ensayo según la norma AASHTO T 245-97(2004) para determinar la estabilidad y flujo procede de la manera siguiente: Los especímenes preparados con cemento asfáltico son colocados en baño de maría de 30 a 40 minutos, manteniendo la temperatura del baño de maría a 60 ± 1 °C (140 ± 1.8 °F). Pasado este tiempo se colocan los cabezales de ensayo en el baño maría unos segundos antes de iniciar el ensayo. Se remueva la briqueta del baño de maría y se coloca en la parte interna del cabezal de ensayo inferior. Colocamos el segmento superior del cabezal de ensayo sobre la briqueta, y se pone el ensamble completo en posición en la máquina de ensayo (ver Figura 3.28).



FIGURA 3.28 Colocación de briqueta antes de ensayo: Sacar las briquetas del baño de maría-Colocación en maquina de ensayo de ensamble briqueta + quijada.
Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque.

Seguidamente se coloca el medidor de flujo que será utilizado, en la posición correcta sobre una de las barras guía y se ajusta el medidor de flujo a cero mientras se sostiene la manga firmemente en contra del segmento superior del cabezal de ensayo (ver figura 3.29).

Se aplica la carga a una razón de un movimiento constante de 50.8 mm/min (2 pulg/min) hasta que la carga máxima es alcanzada y la carga decrece como es indicada por el dial. Las lecturas tanto del dial de estabilidad como de flujo son registradas.



**FIGURA 3.29 Colocación de briqueta antes de ensayo:
Colocación del medidor de flujo- Aplicación de la carga a las briquetas**
Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad.

Los resultados del ensayo de estabilidad y flujo se presentan en la Tabla 3.20

BRIQUETA	VOLUMEN cm ³	CORRECCION	FLUJO	LECTURA DE ESTABILIDAD
4.0%				
I	500.9	1.04	12	445
II	496.9	1.04	12	496
III	494.1	1.09	13	483
PROMEDIO			3.13	
4.5%				
I	496.6	1.04	15	475
II	497.7	1.04	14	481
III	497.8	1.04	12	489
PROMEDIO			3.47	
5.0%				
I	495.9	1.09	15	439
II	493.4	1.09	12	469
II	490.5	1.09	13	494
PROMEDIO			3.39	
5.5%				
I	482.9	1.09	12	506
II	488.6	1.09	14	434
II	481.87	1.09	12	450
PROMEDIO			3.22	
6.0%				
I	482.94	1.14	14	446
II	481.34	1.14	14	536
II	484.59	1.09	16	435
PROMEDIO			3.73	

TABLA 3.20 Resumen del cálculo de Estabilidad y Flujo, Fuente: Presentación de los autores.

La estabilidad para el punto de 4.0% se calcula con la ecuación siguiente:

Ecuación estabilidad:

$$F_i = A + B(L_c) + C(L_c)^2$$

Fi: Es la fuerza de la ecuación de mejor ajuste que se aplica al equipo bajo prueba en Kg.

Coeficientes A, B y C:

$$A = -4.78404$$

$$B = 9.478993$$

$$C = -0.000228264$$

Lc: Es la lectura observada en el indicador bajo una fuerza aplicada y corregida a la temperatura de calibración, mediante la ecuación:

$$L_c = L_i (1 + 0.00027(t - t_c))$$

Dónde:

Li: Es la lectura observada en el indicador bajo una fuerza aplicada, a la temperatura t ($^{\circ}C$): del equipo a prueba.

tc: Es la temperatura de calibración del equipo a prueba.

➤ Corrección por temperatura de calibración del equipo:

Lectura Estabilidad Briqueta I: 445

$$L_{\text{CORREGIDA } \Delta t} = 445 \times (1 + 0.00027 \times 3) = 445.360$$

ESTABILIDAD

$$\begin{aligned} &= -4.78404 + (9.478993 \times 445.360) + (-0.000228264 \times 445.360^2) \\ &= \mathbf{4262.027 \text{ Kg}} \end{aligned}$$

➤ **Cálculo de estabilidad corregida briqueta I**

Factor de Corrección

El volumen de cada briqueta se obtiene de la resta del peso saturado superficialmente seco y el peso sumergido respectivo de cada briqueta en la Tabla 5.1. En este caso para la briqueta I:

$$1151.1 - 650.2 = 500.9$$

Luego se determina el factor de corrección en la tabla del **Anexo 2**, el valor de volumen de 500.9 está entre 496 a 508 de la primera columna de dicha tabla, por lo tanto el factor de corrección en la columna 4 es de 1.04

$$\mathbf{ESTABILIDAD_{CORREGIDA} = (1.04 \times 4262.027) = 4432.50 \text{ Kg.}}$$

Lectura Estabilidad Briqueta II: 496

$$\mathbf{L_{CORREGIDA \Delta t} = 496 \times (1 + 0.00027 \times 3) = 496.40}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{ESTABILIDAD} &= -4.78404 + (9.478993 \times 496.40) + (-0.000228264 \times 496.40^2) \\ &= \mathbf{4756.83 \text{ Kg}} \end{aligned}$$

➤ **Cálculo de estabilidad corregida briqueta II**

Factor de Corrección

Volumen para la briqueta II:

$$1151 - 654.1 = 496.9$$

El valor de volumen de 496.9 está entre 496 a 508 por lo tanto el factor de corrección es de 1.04

$$\begin{aligned}\text{ESTABILIDAD}_{\text{CORREGIDA}} &= (1.04 \times 4756.83) \\ &= 4947.10 \text{ Kg.}\end{aligned}$$

Lectura Estabilidad Briqueta III: 483

$$L_{\text{CORREGIDA } \Delta t} = 483 \times (1 + 0.00027 \times 3) = 483.39$$

$$\begin{aligned}\text{ESTABILIDAD} &= -4.78404 + (9.478993 \times 483.39) + (-0.000228264 \times 483.39^2) \\ &= 4523.92 \text{ Kg}\end{aligned}$$

➤ **Cálculo de estabilidad corregida briqueta III**

Factor de Corrección

Volumen para la briqueta III:

$$1143 - 648.9 = 494.1$$

El valor de volumen de 494.1 está entre 483 a 495 por lo tanto el factor de corrección es de 1.09

$$\text{ESTABILIDAD}_{\text{CORREGIDA}} = (1.09 \times 4523.92)$$

$$= 4331.07 \text{ Kg.}$$

Estabilidad promedio, la cual se utilizará como valor de estabilidad para el punto de diseño con un contenido de 4.0% Asfalto.

$$\text{ESTABILIDAD}_{\text{PROM}} = \frac{4432.50+4947.10+4331.07}{3} = 4570.2233 \text{ Kg.}$$

Después de haber determinado la estabilidad, el siguiente paso es el cálculo del flujo para cada punto con determinado porcentaje de asfalto se obtiene simplemente multiplicando la lectura de cada briqueta por el factor de 0.254 para convertirlo a milímetros, y luego se promedian los valores de las 3 briquetas.

Para el punto de 4% de Cemento asfáltico:

Briqueta I

Lectura=12

$$\text{Flujo mm} = 12 \times 0.254 = 3.04 \text{ mm}$$

Briqueta II

Lectura=12

$$\text{Flujo mm} = 12 \times 0.254 = 3.04 \text{ mm}$$

Briqueta III

Lectura=13

$$\text{Flujo mm} = 12 \times 0.254 = 3.30 \text{ mm}$$

$$\text{FLUJO}_{\text{PROM}} = \frac{3.04+3.04+3.30}{3} = 3.13 \text{ mm.}$$

3.9. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO.

Después que se han realizado los ensayos Marshall en laboratorio es necesario realizar el tercer procedimiento contemplado en el método Marshall: análisis de la densidad y el contenido de vacíos en las briquetas; esto se hace mediante al análisis de los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio, para ello se deben hacer diversos cálculos para obtener ciertos valores y posteriormente elaborar los seis gráficos con los que se podrá obtener el contenido óptimo de asfalto para el diseño. Este análisis comprende:

- Densidad
- Vacíos de aire
- Vacíos en el agregado mineral
- Vacíos llenos de asfalto

3.9.1. Análisis de la Densidad.

La densidad de cada serie de briquetas de prueba es calculada multiplicando la Gravedad Específica Bulk por la densidad del agua a la temperatura de ensayo (25 °C), que por lo general se ocupa 1000 Kg/m³ y su fórmula es:

$$\text{Densidad} = G_{mb} \times 1000 \text{ Kg/m}^3$$

Donde:

G_{mb} = Gravedad específica Bulk

Los valores de densidad para cada dosificación de asfalto han sido calculados a partir de los promedios de la gravedad específica bulk, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.21

CONTENIDO DE ASFALTO	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%
Gravedad Especifica Máxima Teórica	2.485	2.475	2.442	2.438	2.411
Gravedad Especifica Bulk	2.301	2.317	2.336	2.368	2.385
Densidad (Kg/m³)	2.301	2.317	2.336	2.368	2.385
% de Vacíos	7.405	6.377	4.355	2.879	1.094

TABLA 3.21 Resumen gravedad específica Bulk, Gravedad específica teórica máxima y porcentaje de vacíos, Fuente: Presentación de los autores.

Ejemplo para 4.0% de Cemento Asfáltico

$$\text{Densidad} = 2.301 \times 1000 \text{ Kg/m}^3 = 2,301 \text{ Kg/m}^3$$

3.9.2. Análisis de vacíos de aire.

El propósito del análisis es determinar el porcentaje de vacíos en la mezcla compactada, el cual en el diseño debe de estar entre 3 y 5%. Los vacíos son pequeñas bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. Como ya se había mencionado antes existe una relación entre la gravedad específica bulk y la teórica máxima ya que son de las cuales se obtiene el porcentaje de vacíos, la teórica máxima no contempla vacíos en la muestra; mientras que una briqueta compactada sí contiene vacíos en su interior, por lo tanto la gravedad específica bulk es menor que la teórica máxima. Para el cálculo del porcentaje de vacíos se da un ejemplo a continuación,

La fórmula para el porcentaje de vacíos es:

$$P_a = \frac{100 \times G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

Dónde:

P_a = Vacíos de aire en mezcla compactada, porcentajes del volumen total

G_{mm} = Gravedad específica máxima teórica de mezclas de pavimentación

G_{mb} = Gravedad específica Bulk de mezclas compactadas

Se toman datos para un contenido de asfalto de 4.0 %, ver en Tabla 5.4

$$G_{mm} = 2.485$$

$$G_{mb} = 2.301$$

$$P_a = \frac{100 \times 2.485 - 2.301}{2.485}$$
$$= 7.405\%$$

3.9.3. Análisis de vacíos en el agregado mineral.

Los vacíos en el agregado mineral VMA están definidos por el espacio intergranular de vacíos que se encuentran entre las partículas de agregado de la mezcla para pavimentación compactada, incluye los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto, y se expresa como un porcentaje del volumen total de la mezcla. Para los vacíos en agregado mineral se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 3.22:

CONTENIDO DE ASFALTO	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%
Porcentaje de Agregado	96%	95.5%	95%	94.5%	94%
Gravedad Especifica Bulk de la briqueta	2.301	2.317	2.336	2.368	2.385
Gravedad Esp. Bulk de la combinación de agregados	2.595	2.595	2.595	2.595	2.595
% VMA	14.878%	14.716%	14.486%	13.77%	13.604%

TABLA 3.22 Resumen para el cálculo de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA), Fuente: Presentación de los autores.

A continuación se da un ejemplo de cálculo para el 4.0% de cemento asfáltico, con su respectiva formula:

$$VMA = 100\% - \left[\frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \right]$$

Dónde:

VMA= Vacíos en Agregado Mineral (porcentaje de volumen total de la mezcla)

G_{sb}= Gravedad Específica Bulk de la combinación de agregados

G_{mb}= Gravedad Específica Bulk de la mezcla compactada

P_s= Porcentaje de Agregado, por peso total en la mezcla

P_s = 100-4.0 = 96.0%, se opera como valor (96.0).

$$G_{mb} = 2.301$$

$$G_{sb} = 2.595$$

$$VMA = 100\% - \left[\frac{2.301 \times 96}{2.595} \right]$$

$$= 14.876\%$$

3.9.4. Análisis de vacíos llenos de asfalto (VFA).

Los vacíos llenos de asfalto, VFA, son el porcentaje de vacíos intergranulares entre las partículas de agregados (VMA) que se encuentran llenos de asfalto. El VMA abarca asfalto y aire, mientras que el VFA sólo el asfalto que une a los agregados (asfalto efectivo), el valor de VFA se expresa como un porcentaje. Finalmente se calculan los vacíos llenos de asfalto dándonos los resultados de la Tabla 3.23

CONTENIDO DE ASFALTO	4.0%	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%
Vacios en el Agregado Mineral VMA %	14.878%	14.716%	14.486%	13.77%	13.604%
Porcentaje de vacios P _a %	7.405	6.377	4.355	2.879	1.094
Vacios llenos de Asfalto VFA %	50.232	56.665	69.935	79.096	91.958

**Tabla 3.23 Resumen para el cálculo del Porcentaje de Vacíos Llenos de Asfalto (VFA),
Fuente: Presentación de los autores.**

A continuación se da un ejemplo del cálculo de los vacíos llenos de asfalto para un contenido de 4.0 % de cemento asfáltico, a continuación su respectiva formula:

$$\mathbf{VFA = 100\% - \left[\frac{VMA - P_a}{VMA} \right]}$$

Dónde:

VFA= vacíos llenos con asfalto, porcentaje de VMA

VMA= vacíos en agregado mineral (porcentaje de volumen bula)

Pa= vacíos de aire en mezcla compactada, porcentajes del volumen total

$$\mathbf{VMA = 14.878\% \text{ y } P_a = 7.405\%}$$

$$\mathbf{VFA = 100\% \times \left[\frac{14.878 - 7.405}{14.878} \right] = 50.228 \%}$$

3.10. GRÁFICOS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Finalmente con todos los datos necesarios de los ensayos realizados para cada uno de los puntos del diseño y teniendo en cuenta las normas establecidas para ello, se procedió al cálculo de la densidad bulk, gravedad específica máxima teórica, los vacíos en el agregado mineral (VMA), el porcentaje de vacíos en la mezcla, estabilidad y flujo, etc. con los cuales se procede a la elaboración de los gráficos contemplados por el método Marshall. A continuación se presenta una tabla resumen de los datos necesarios para la generación de los gráficos.

PORCENTAJE DE ASFALTO	PORCENTAJE DE VACIOS	V.M.A.	V.F.A.	GRAVEDAD ESPECIFICA BULK (Kg/m ³)	GRAVEDAD ESPECIFICA MAXIMA TEORICA (Kg/m ³)	ESTABILIDAD(Kg)	FLUJO (mm)
4.0	7.41%	14.88%	50.23%	2.301	2.485	2199	3.13
4.5	6.34%	14.72%	56.67%	2.317	2.475	2175	3.47
5.0	4.36%	14.49%	69.94%	2.336	2.442	2211	3.39
5.5	2.88%	13.77%	79.10%	2.368	2.438	2192	3.22
6.0	1.09%	13.60%	91.96%	2.385	2.411	2268	3.73

TABLA 3.24 Resumen para el trazado de los gráficos del Método Marshall

Después de la realización de los ensayos y obtener sus resultados, estos son trazados en los gráficos, para poder analizar las características particulares de cada briqueta usada en la serie.

Los valores graficados en el eje de las ordenadas (Y) son: porcentaje de vacíos, porcentaje de VMA, porcentaje de VFA, Densidad, Estabilidad y Fluencia, todos contra el valor en las abscisas (X) que son los diferentes porcentajes de asfalto.

3.10.1. Observaciones y tendencias de las gráficas de diseño.

Cuando los resultados de los ensayos se trazan en gráficas, usualmente revelan ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. A continuación se enuncian ciertas tendencias que pueden observarse al estudiar las gráficas:

- El porcentaje de vacíos disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VMA) generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (%VFA) aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.

- La curva para la densidad de la mezcla es similar a la curva de estabilidad, excepto que la densidad máxima se presenta a un contenido de asfalto ligeramente mayor que el que determina la máxima estabilidad.
- Hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentan a medida que el contenido de asfalto aumenta. Más allá de este punto, la estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de asfalto.

- Los valores de fluencia aumentan con aumentos en el contenido de asfalto.

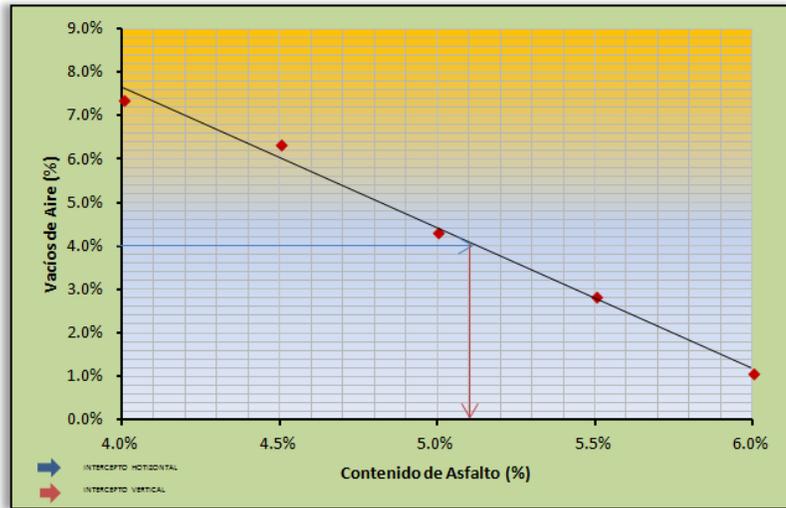


FIGURA 3.30 Gráfico Porcentaje de vacíos - Contenido de Asfalto
Fuente: Presentación de los autores

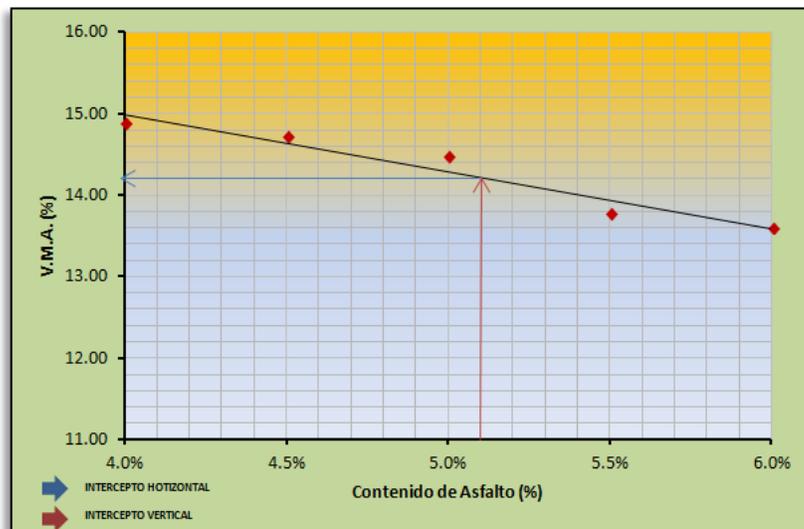


FIGURA 3.31 Gráfico %VMA - Contenido de Asfalto
Fuente: Presentación de los autores

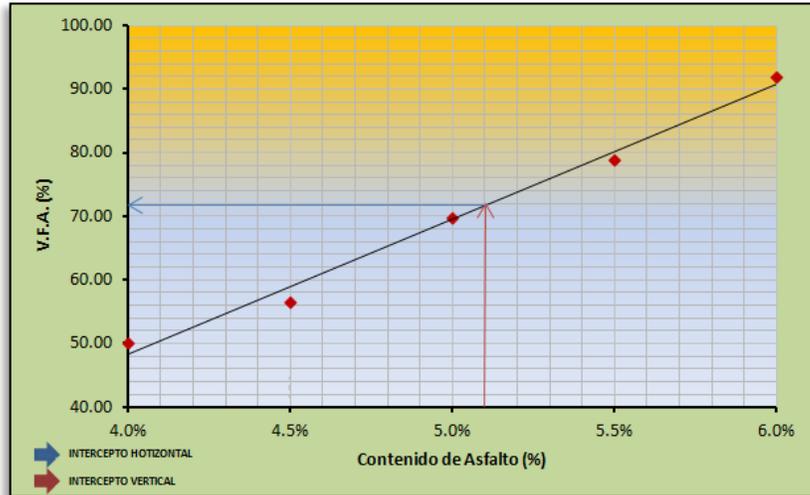


FIGURA 3.32 Gráfico %VFA - Contenido de Asfalto
Fuente: Presentación de los autores

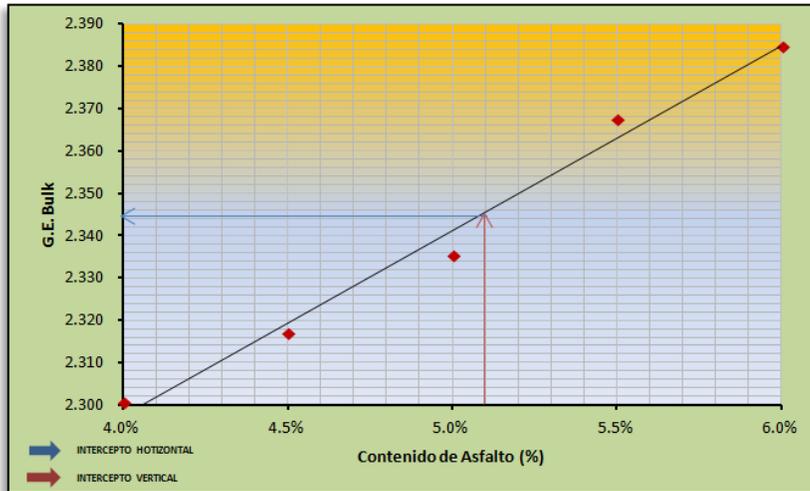


FIGURA 3.33 Gráfico Densidad - Contenido de Asfalto
Fuente: Presentación de los autores

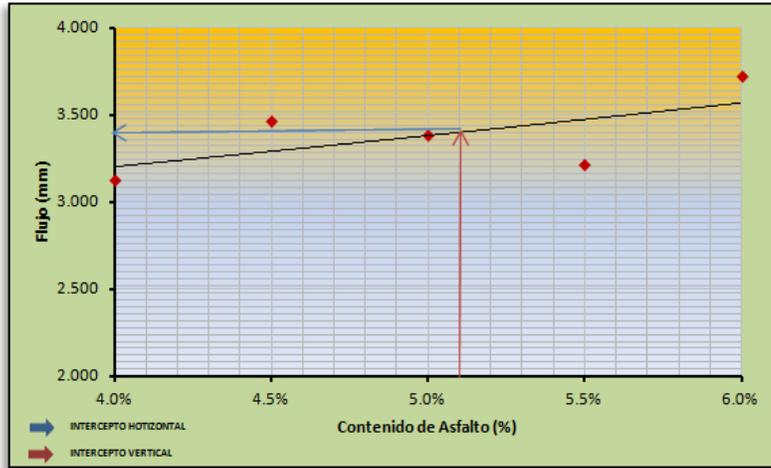


FIGURA 3.34 Gráfico Flujo - Contenido de Asfalto
Fuente: Presentación de los autores

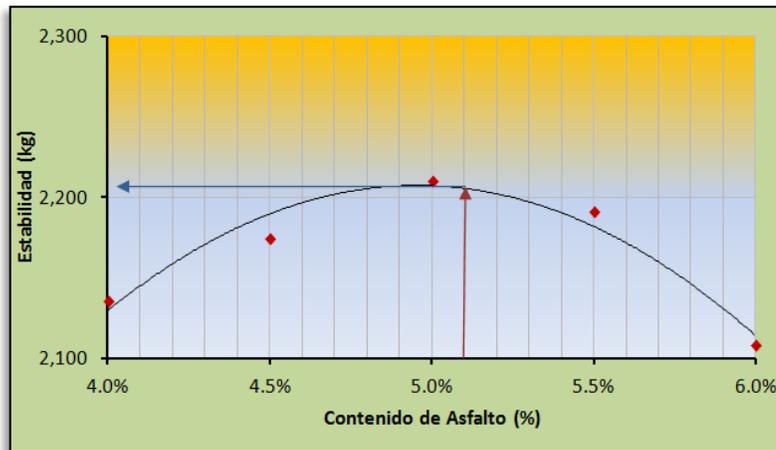


FIGURA 3.35 Gráfico Estabilidad - Contenido de Asfalto
Fuente: Presentación de los autores

Los gráficos anteriores proporcionan los resultados de los ensayos Marshall. Cada gráfica tiene trazados los resultados de los diferentes ensayos, los valores de estos resultados están representados por los puntos de contenido de asfalto de **4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%**.

3.11. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO.

El contenido óptimo de cemento asfáltico para el diseño de mezcla se determina a partir del análisis de los resultados del gráfico de la Figura 3.30. El requisito del método Marshall para vacíos en mezclas asfálticas diseñadas en laboratorio es de 3 a 5%, para analizar las gráficas primeramente se obtiene el valor promedio de dichos vacíos que es 4% de vacíos, con este valor son comprobados todos los parámetros. Se traza una línea horizontal que corte el valor de 4% de vacíos en el eje de las ordenadas e intercepte la gráfica, desde este punto de intercepción se traza una línea vertical que corte el eje horizontal (abscisas) y se registra el valor de porcentaje de cemento asfáltico en dicha intersección; el valor determinado de esta forma será tomado como el contenido óptimo de cemento asfáltico. Luego, con este contenido óptimo de cemento asfáltico se evalúa todos los gráficos para encontrar todos los parámetros de control y luego compararlos con las especificaciones de diseño del método Marshall para tráfico alto, para verificar si los valores encontrados cumplen. La manera para encontrar todos los parámetros es trazando una línea vertical desde el contenido óptimo de cemento asfáltico encontrado anteriormente, hasta que esta línea intercepte la gráfica; luego a partir de esta intercepción se traza una línea horizontal que intercepte el eje vertical, de esta manera se pueden obtener cada uno de los parámetros de control que serán comparados con las especificaciones. Si se cumplen todos los criterios de las especificaciones, el contenido de cemento asfáltico encontrado con el cual se evaluaron todos los parámetros, será considerado el contenido de asfalto óptimo

para el diseño de la mezcla. Con uno de los criterios que no cumpla será necesario hacer algunos ajustes o volver a rediseñar la mezcla.

Parámetros de diseño encontrados.

Del procedimiento de análisis del gráfico de la Figura 3.30, se obtuvieron los siguientes datos: para un contenido de 4.1% de vacíos se determinó un **5.1 %** de cemento asfáltico, luego con este contenido de cemento asfáltico se determinaron los valores de las otras propiedades:

Cemento asfáltico = **5.1 %**

Porcentaje de VMA = **14.2%**

Porcentaje de VFA = **72.0%**

Densidad = **2343 Kg/m³**

Estabilidad = **2208Kg**

Fluencia = **3.40 mm**

CONSTRUCTORA DISA S.A. de C.V.		DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE POR EL METODO MARSHALL											FECHA:		22/04/2014	
PLANTA ASFÁLTICA		Según el Instituto del Asfalto, Manual Series MS-2											MEZCLA:			
		MEZCLA TMN 3/4"														
% CEMENTO ASFÁLTICO		4.0%			4.5%			5.0%			5.5%			6.0%		
N° DE PROBETA		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Gravedad Específica BULK	W _{Al Aire}	1,147.1	1,146.7	1,138.4	1,154.0	1,152.6	1,155.1	1,155.4	1,151.2	1,149.6	1,145.1	1,150.8	1,145.7	1,151.8	1,150.3	1,153.0
	W _{SSS}	1,151.1	1,151.0	1,143.0	1,157.1	1,156.2	1,157.4	1,157.9	1,154.2	1,151.1	1,145.1	1,151.1	1,146.5	1,152.2	1,150.7	1,153.3
	W _{sumergido}	650.2	654.1	648.9	660.5	656.5	659.6	662.0	660.8	660.6	662.2	662.5	664.3	669.2	669.4	668.7
	V _{probeta}	500.9	496.9	494.1	496.6	499.7	497.7	495.9	493.5	490.5	482.9	488.6	482.2	482.9	481.3	484.6
	Densidad Probeta	2.290	2.308	2.304	2.324	2.307	2.321	2.330	2.333	2.344	2.371	2.355	2.376	2.385	2.390	2.379
	Densidad Media	2.301			2.317			2.336			2.368			2.385		
Estabilidad	Lectura del Anillo	440	450	460	475	481	489	439	469	494	506	434	450	446	536	435
	Factor de Corrección	1.09	1.04	1.09	1.04	1.04	1.04	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.14	1.14	1.09
	Estabilidad (kg)	2,039	2,033	2,179	2,144	2,172	2,208	2,075	2,219	2,338	2,396	2,051	2,128	2,158	2,589	2,056
	Estabilidad Promedio	2,084			2,175			2,211			2,192			2,268		
Flujo	Lectura del Anillo	12	12	13	15	14	12	15	12	13	12	14	12	14	14	16
	Flujo (mm)	3.05	3.05	3.30	3.81	3.56	3.05	3.81	3.05	3.30	3.05	3.56	3.05	3.56	3.56	4.06
	Flujo Promedio	3.13			3.47			3.39			3.22			3.73		
Estabilidad / Deformación		665.2			626.5			652.8			681.2			608.7		
Gravedad Específica Teórica Máxima	W _{inicial}	2,597.40			2,578.60			2,597.70			2,646.40			2,651.50		
	W _{Picnómetro+Agua}	11,754.80			11,754.80			11,754.80			11,754.80			11,754.80		
	W _{Antes del Ensayo}	14,352.20			14,333.40			14,352.50			14,401.20			14,406.30		
	W _{Después del Ensayo}	13,306.80			13,291.50			13,288.70			13,315.60			13,306.60		
	W _{antes - W Después}	1,045.40			1,041.90			1,063.80			1,085.60			1,099.70		
	G.E. Teórica Máxima	2.485			2.475			2.442			2.438			2.411		
Análisis de Vacíos	% Asfalto	4.0%			4.5%			5.0%			5.5%			6.0%		
	W _{ASFALTO}	9.202			10.427			11.678			13.022			14.308		
	V _{ASFALTO}	8.633			9.781			10.955			12.215			13.423		
	% Agregados	96.0%			95.5%			95.0%			94.5%			94.0%		
	W _{AGREGADO}	220.860			221.280			221.878			223.734			224.165		
	V _{AGREGADO}	85.122			85.284			85.514			86.230			86.396		
	V _{MEZCLA}	93.755			95.065			96.469			98.445			99.818		
	% Vacíos	7.405%			6.377%			4.355%			2.879%			1.094%		
	V.M.A.	14.878%			14.716%			14.486%			13.770%			13.604%		
V.F.A.	50.232%			56.665%			69.935%			79.096%			91.958%			

3.25 Cuadro resumen diseño de mezcla asfáltica, para agregado con tamaño máximo de 3/4" Fuente: Presentación de los autores.

3.12. PUNTO DE COMPROBACIÓN.

Para verificar los resultados obtenidos, se realizaron un proporcionamiento para el porcentaje óptimo determinado de 5.1% de cemento asfáltico. A este punto se le realizaron los ensayos de Gravedad Especifica Bulk AASHTO T-166-00, Gravedad Teórica Máxima ASTM D 2041, Estabilidad y Flujo AASHTO T245-97 (2004), así como también se realizaron los ensayos de extracción de asfalto ASTM D 2172-05 y Análisis Granulométrico del agregado extraído, ver tabla 5.16.

El proceso de ensayo y cálculos desarrollado para los ensayos de Gravedad Especifica Bulk T-166-05, Gravedad Teórica Máxima ASTM D 2041 y Estabilidad y Flujo T-245-97 (2004) son los mismos explicados anteriormente para el 4% de Asfalto, por lo que se presenta a continuación los resultados obtenidos del punto de comprobación para estos ensayos.

N° DE PROBETA		1	2	3
Gravedad Específica BULK ASTM D2726 AASHTO T166	$W_{Al\ Aire}$	1,156.1	1,152.2	1,151.0
	W_{SSS}	1,157.9	1,153.4	1,153.4
	$W_{sumergido}$	668.5	666.2	663.4
	$V_{Probeta}$	489.38	487.1	490.1
	Densidad Probeta	2.362	2.365	2.349
	Densidad Media	2.359		
Estabilidad AASHTO T245	Lectura del Anillo	435	568	531
	F. Corrección	1.09	1.09	1.09
	Estabilidad (kg)	2,017.1	2,626.0	2,457.0
	Estabilidad (kg)	2,367		
Flujo AASHTO T245	Lectura del Anillo	10	9	13
	Flujo (mm)	2.54	2.29	3.30
	Flujo (mm)	2.71		
Gravedad Específica Teórica Máxima ASTM D2041	$W_{inicial\ de\ la\ muestra}$	2,555.8		
	$W_{picnómetro + agua}$	11,754.8		
	$W_{ANTES\ DEL\ ENSAYO}$	14,310.6		
	$W_{DESPUES\ DEL\ ENSAYO}$	13,266.3		
	$W_{antes} - W_{Después}$	1,044.3		
	G.E. Teórica Máx.	2.447		
Contenido de Asfalto ASTM D6307	$W_{inicial\ de\ la\ muestra}$	2,037.10		
	Humedad	0.00		
	$W_{de\ la\ muestra\ seca}$	2,037.10		
	PP.N EXT	1,925.40		
	FINOS ADHERIDOS	1.60		
	CENIZA	3.00		
	P.A.T.EXT.	1,930.00		
	Diferencia	107.10		
	W MATERIAL MINERAL	1.60		
	% Asfalto	5.3 %		

3.26 Cuadro resumen diseño ensayos al punto de comprobación.

Análisis de Vacíos	W_{ASFALTO}	12.401
	V_{ASFALTO}	11.634
	% Agregados	94.7%
	W_{AGREGADO}	223.482
	V_{AGREGADO}	86.120
	V_{MEZCLA}	97.754
	% Vacíos	3.618%
	V.M.A.	13.880%
	V.F.A.	73.933%

**TABLA 3.26 Cuadro resumen diseño ensayos al punto de comprobación. (continuación),
Fuente: Presentación de los autores.**

3.12.1. Extracción cuantitativa de asfalto en mezclas de pavimento bituminoso ASTM D 2172-05

Se procede con la extracción y pesado de la muestra a ensayar según la norma (ver figura 3.36), luego colocar la muestra en el tazón, cubrir la porción de ensayo en el tazón con tricloroetileno, cloruro de metileno, propil bromuro normal o extracto de terpeno y darle suficiente tiempo para que el solvente se desintegre en la porción de ensayo (no más de 1 hora). Colocar el tazón conteniendo la porción de ensayo y el solvente en el aparato de extracción (ver figura 3.37). Secar el filtro hasta alcanzar una masa constante en un horno a 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F) y ajustarlo alrededor del borde del tazón, sujetar la cubierta en el tazón con abrazadera firmemente y colocar un contenedor apropiado bajo del tubo de desagüe para recoger el extracto.



Figura 3.36 Mezcla siendo vertida en el tazón, Mezcla en el tazón
Fuente: Presentación de los autores
Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

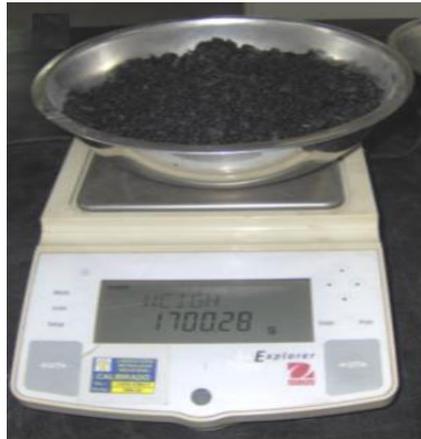


Figura 3.37 Mezcla siendo pesada para este ensayo.
Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque,
Constructora DISA, La Libertad

Iniciar la centrifugadora dando vueltas lentamente y que gradualmente aumente la velocidad a un máximo de 3600 r/min hasta que el solvente deje de fluir en el tubo de desagüe. Permitir que la máquina se detenga, añadir 400 ml de tricloroetileno

(o más según lo apropiado para la masa de la muestra), o cloruro de metileno, propil bromuro normal o extracto de terpeno y repetir el procedimiento (ver Figura 3.38). Utilizar las suficientes adiciones de solventes de modo que el extracto no sea más oscuro que un color pajizo claro (amarillento). Depositar el extracto y los lavados en un contenedor apropiado para la determinación de materia mineral.



Figura 3.38 Mezcla siendo vertida en el tazón, Mezcla en el tazón
Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

CALCULO DE EXTRACCIÓN DE ASFALTOS

Para un contenido de asfalto de 5.1 %:

W_1 = Peso de la porción de ensayo = 2037.1 g

W_3 = Peso del agregado extraído = 1925.4 g

Peso inicial de filtro = 24.8g

Peso de filtro después de extracción = 26.4 g

Calculando el peso del agregado retenido en el filtro:

$W_4 = 26.4 - 24.8 = 1.6$

$$\text{CONTENIDO DE LIGANTE ASFALTICO} = \frac{2037.1 - (1925.4 + 1.6)}{2037.1} = 5.30$$

3.12.2. ANALISIS MECÁNICO DE AGREGADO EXTRAIDO

Se realizó el análisis granulométrico al agregado extraído después del ensayo de extracción de asfalto colocando la muestra obtenida en un recipiente y secándola en cocina hasta por lo menos 2 horas hasta que la humedad desaparezca por completo, cuando esto ocurre se enfría el material a temperatura ambiente (27°C), para luego ser colocado en el agitador mecánico por 15 minutos transcurrido este tiempo se procede a sacar los pesos retenidos en cada tamiz. Se presenta el resumen del ensayo en la tabla 3.35.



Figura 3.39 Calentamiento de agregado extraído y colocado en agitador mecánico para ensayo de granulometría

Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad

ENSAYO GRANULOMÉTRICO (ASTM D 5444)									
$W_{inicial}(G)=1,925.40$		Grava (%)=	44.5%	Arena(%)=	50.1%	Fino(%)=	5.4%	máx.=	3/4"
MALLA		$W_{Retenido}$ Parcial	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que Pasa	Franja de Control			
NOMBRE	mm								
1 1/2"	37.50	0.00	0.0 %	0.0 %	100.0 %	100	100		
1"	25.40	0.00	0.0 %	0.0 %	100.0 %	100	100		
3/4"	19.00	0.00	0.0 %	0.0 %	100.0 %	97	100		
1/2"	12.50	320.20	16.6 %	16.6 %	83.4 %	81	91		
3/8"	9.50	202.90	10.5 %	27.2 %	72.8 %	70	82		
No.4	4.75	333.40	17.3 %	44.5 %	55.5 %	51	65		
No.8	2.36	256.20	13.3 %	57.8 %	42.2 %	38	48		
No.16	1.18	231.10	12.0 %	69.8 %	30.2 %	25	35		
No.30	0.60	176.10	9.1 %	78.9 %	21.1 %	17	25		
No.50	0.30	139.60	7.3 %	86.2 %	13.8 %	11	17		
No.100	0.15	97.30	5.1 %	91.2 %	8.8 %	6	12		
No.200	0.075	64.80	3.4 %	94.6 %	5.4 %	4	8		
FONDO	0.00	103.80	5.4 %	100.0 %	0.0 %				
TOTALES		1,925.40	100.0 %						

Tabla 3.27 Resumen de ensayo de granulometría a agregado extraído, Fuente: Presentación de los autores.

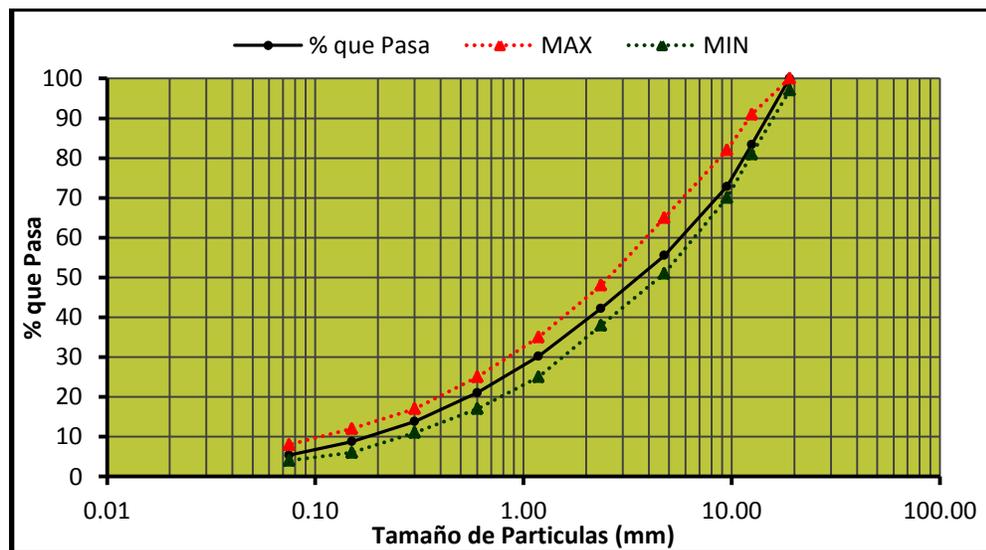


Figura 3.40 Gráfico de granulometría a agregado extraído. Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio Planta Asfáltica, Plantel, Quezaltepeque, Constructora DISA, La Libertad.

3.13. ENSAYO DE EFECTO DE HUMEDAD EN MEZCLAS DE CONCRETO ASFALTICO PARA PAVIMENTOS ASTM D 4867

Este método establece los procedimientos para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico con el propósito de medir el efecto de agua sobre la resistencia a la tracción indirecta. Este método es aplicable a mezclas densas y se usa para evaluar el efecto de humedad en las mezclas elaboradas con o sin aditivo.

La susceptibilidad de daño por humedad se determina preparando un grupo de especímenes compactados en laboratorio de acuerdo con la fórmula de trabajo de la mezcla. Los especímenes son compactados a niveles de vacíos que oscilan entre 6% y 8%. El grupo es dividido en dos subgrupos con contenidos de vacíos relativamente iguales; cada espécimen debe tener su par en el otro grupo. Un grupo es mantenido en seco mientras que el otro es parcialmente saturado con agua y acondicionado en un baño de agua. El potencial daño por humedad es indicado por la relación entre la resistencia a la tensión del subgrupo húmedo y del subgrupo seco. Los resultados de este ensayo se determinan en la tabla 3.28

MUESTRAS EN CONDICIÓN SECA						
Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro mm D	101	101	101	101	101	101
Espesor mm t	61.97	62.79	62.22	62.20	62.42	62.19
Peso seco al aire A	1132.19	1142.93	1134.17	1130.15	1133.83	1132.7
Peso Saturado con Superficie Seca B	1141.62	1152.35	1142.89	1138.54	1143.04	1140.58
Peso sumergido C	639.25	643.28	638.51	634.26	637.03	636.44
Volumen (B-C) E	502.37	509.07	504.38	504.28	506.01	504.14
Gravedad Bulk (A/E) F	2.254	2.245	2.249	2.241	2.241	2.247
Teórica Máxima G	2.421	2.421	2.421	2.421	2.421	2.421
% Vacíos (100(G-F)/G) H	6.91	7.26	7.12	7.43	7.45	7.20
Volumen de vacíos de aire HE/100 I	34.72	36.98	35.91	37.47	37.68	36.28
Lectura	210	210	210			
Coficiente	1.04	1.04	1.04			
Carga Kg P	943.04 Kg	943.04 Kg	943.04 Kg			
Carga lb P	2078.92 Lb	2078.92 Lb	2078.92 Lb			
Carga N P	9251.19 N	9251.19 N	9251.19 N			
MUESTRAS PARCIALMENTE SATURADAS 5 MINUTOS A 525 mm Hg						
Peso Saturado con Superficie Seca B'				1152.18	1156.15	1153.71
Peso sumergido C'				642.96	643.08	642.11
Volumen (B'-C') E'				509.22	513.07	511.6
Volumen Abs de Agua (B'-A) J'				22.03	22.32	21.01
% Saturación (100J'/I)				58.80	59.24	57.92
% Hinchamiento (100(E'-E)/E)				0.98	1.40	1.48
MUESTRAS SUMERGIDAS 24 H EN AGUA A 60 °C						
Espesor mm t''				63.41	63.75	63.65
Peso Saturado con Superficie Seca B''				1160.7	1164.49	1162.78
Peso sumergido C''				646.66	647.68	646.78
Volumen (B''-C'') E''				514.04	516.81	516
Volumen Abs de Agua (B''-A) J''				30.55	30.66	30.08
% Saturación (100J''/I)				81.53	81.37	82.92
% Hinchamiento (100(E''-E)/E)				1.94	2.13	2.35
Lectura				190	190	197
Coficiente				1	1	1
Carga, Kg P''				820.68 Kg	820.68 Kg	850.82 Kg
Carga lb P''				1809.20 Lb	1809.20 Lb	1875.63 Lb
Carga N P''				8050.91 N	8050.91 N	8346.53 N
Tensión Seca 2000 P/πtD S _{td}	941.01	928.62	937.26			
Tensión Seca Promedio		935.63				
Tensión Húmeda 2000 P''/πt''D S _{tm}				800.3260743	796.0364839	826.5611401
Tensión Húmeda Promedio					807.64	
Grado de Tensión TSR 100(S _{tm} /S _{td})	86.32					
Daño por Humedad Visual	No se encontró					
Agregado con grietas o Fracturado	No se encontró					

Tabla 3.28 Resumen de ensayo efecto de humedad en mezclas de concreto asfáltico para pavimentos ASTM D 4867, Fuente: Presentación de los autores.

CAPITULO IV

EVALUACION DE LA MACROTEXTURA

4. EVALUACION DE LA MACROTEXTURA

4.1. TEXTURA

La textura del pavimento es un parámetro crítico en la comodidad y la seguridad de los usuarios, necesario para la conservación de las carreteras. La textura influye directamente en la capacidad del pavimento para evacuar el agua de la interface neumático-pavimento y, de forma indirecta en el valor del coeficiente de rozamiento del pavimento, que tiene gran importancia para la adecuada adherencia entre neumático y pavimento.

Además, la textura es la característica determinante en el nivel de ruido del tráfico, tanto del que perciben los ocupantes de los vehículos como el ruido de entorno que condiciona la calidad de vida de las zonas colindantes. En el aspecto económico, la textura del pavimento influye en el consumo de gasolina, en el deterioro de los vehículos y sobre todo en el desgaste de los neumáticos.

La Textura es una propiedad física del pavimento y se define como *“La geometría más fina del perfil longitudinal de una carretera” según la PIARC 1995 (Asociación Internacional Permanente de los Congresos de Carreteras), hoy en día llamada AIPCR (Asociación Mundial de Carreteras)*. Se clasifica según esta asociación como Megatextura, Macrotextura y Microtextura de acuerdo a su longitud de onda y frecuencia espacial medida (Ver Figura 4.1).

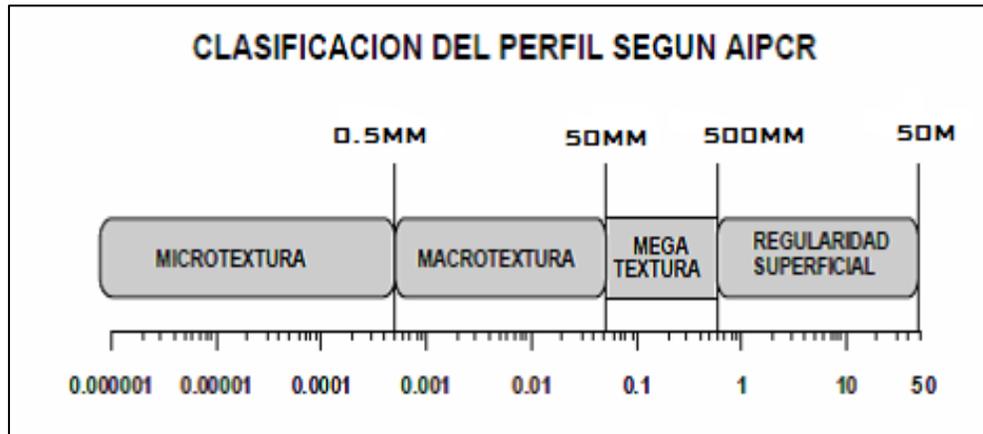


Fig. 4.1 Clasificación del perfil según PIARC

4.1.1. Definiciones de Textura

Es una característica que debe tener la carpeta de rodadura para alcanzar un nivel de seguridad en su resistencia al deslizamiento al momento del frenado, en curvas o en distintas maniobras que el conductor se vea obligado a realizar.

Durante el Congreso Mundial de la AIPCR celebrado en Bruselas en 1987 se definieron tres bandas de textura: microtextura, Macrotextura y Megatextura. Su definición fue establecida por un grupo trabajo de la ISO a partir de la propuesta inicial de la AIPCR. Igualmente se establecen definiciones para las distintas formas de evaluar la textura. Estas definiciones también figuran en la norma ISO/13473 y son las siguientes.

4.1.1.2. Macrotextura

La Macrotextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie en relación con una superficie plana de dimensiones características en sentido

longitudinal comprendidas entre 0,5 y 50 mm (correspondiente a la longitud de onda de textura obtenida con bandas de un tercio de octava entre 0,5 y 50 mm). La amplitud entre picos de la Macrotextura varía normalmente entre 0,01 y 20 mm. Este tipo de textura es la que presenta longitudes de onda del mismo orden que los dibujos del neumático.

La Macrotextura se refiere a la textura superficial del pavimento, proveniente del efecto conjunto de las partículas de los agregados pétreos que sobresalen de la superficie. En este caso, las propiedades de la Macrotextura están dadas por el tipo de mezcla que exista en la superficie, la granulometría y el tamaño máximo nominal de los agregados pétreos que la componen.

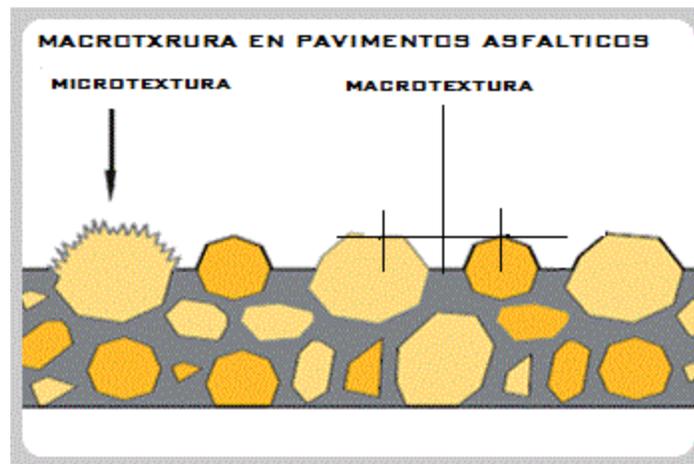


Figura 4.2- Partículas de agregado que sobresalen en el pavimento
Fuente: www.criosist.com

La Macrotextura, proporciona los intersticios necesarios para el escurrimiento del agua por el pavimento, de modo tal que la película de agua que sirve de fase entre el neumático y el pavimento, mantenga un cierto espesor que permita el contacto entre neumático y pavimento. Highways Agency (citado en la Dirección general de carreteras, 1999), ya que la Macrotextura garantiza una menor

distancia de frenado o distancia de parada del vehículo de diseño, disminuye el problema del hidropneumático en pavimentos mojados y el derrapamiento de los neumáticos en los vehículos en las curvas.

La Macrotextura se refiere a irregularidades más grandes en la superficie del pavimento, que afecta la histéresis. Esta clase de irregularidades se asocian con los espacios entre las partículas de agregado. La magnitud de esta componente dependerá de varios factores.

La Macrotextura inicial en la superficie del pavimento será determinada por el tamaño, forma y granulometría del agregado grueso usado en la construcción del pavimento, así como también de las técnicas de construcción empleadas en la colocación de la superficie de rodadura del pavimento. La Macrotextura es también esencial para proporcionar canales de salida al agua en la interacción neumático-pavimento, y de esta manera evitar o reducir el hidropneumático, la Macrotextura y la histéresis son menos importantes para velocidades bajas, pero a medida que se incrementa la velocidad se requiere una mayor Macrotextura. Para velocidades mayores a 50 km/h según norma ASTM E-965. La resistencia al deslizamiento depende principalmente del espaciamiento proporcionado por el agregado, es decir, de la Macrotextura.

4.1.1.3. Microtextura

La microtextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal inferiores a 0,5 mm (correspondiente a la longitud de onda de textura obtenida con bandas de un tercio de octava con ondas de no más de 0,4 mm). La amplitud entre picos suele variar entre 0,001 y 0,5 mm. Este tipo de textura es la

que hace al pavimento más o menos áspero, pero normalmente es tan pequeña que no puede observarse a simple vista.

4.1.1.4. Megatextura

La Megatextura de un pavimento es la desviación que presenta su superficie con respecto a una superficie plana de dimensiones características en sentido longitudinal entre 50 y 500 mm (correspondiente a la longitud de onda de textura obtenida con bandas de un tercio de octava con ondas entre 63 y 500 mm). La amplitud entre picos suele variar entre 0,1 y 50 mm. Este tipo de textura es la que presenta longitudes de onda del mismo orden que el neumático en el contacto con el pavimento (a menudo originadas por baches u ondulaciones).

4.1.1.5. Influencia de la Macrotextura

Como ya se mencionó aspectos relacionados con la seguridad y confort del usuario en la conducción vienen determinados por las características superficiales del pavimento. Cualidades como la resistencia al deslizamiento, disminución del fenómeno del hidropelaje, generación de ruido, en el pavimento vienen dadas por el tipo de mezcla asfáltica seleccionada para la construcción de la capa de rodadura o la capa superficial del pavimento. Estos aspectos funcionales del pavimento están principalmente asociados con la textura y regularidad de la superficie del pavimento en la (figura 4.3) puede observarse la incidencia de cada uno de estos factores sobre las cualidades del pavimento.

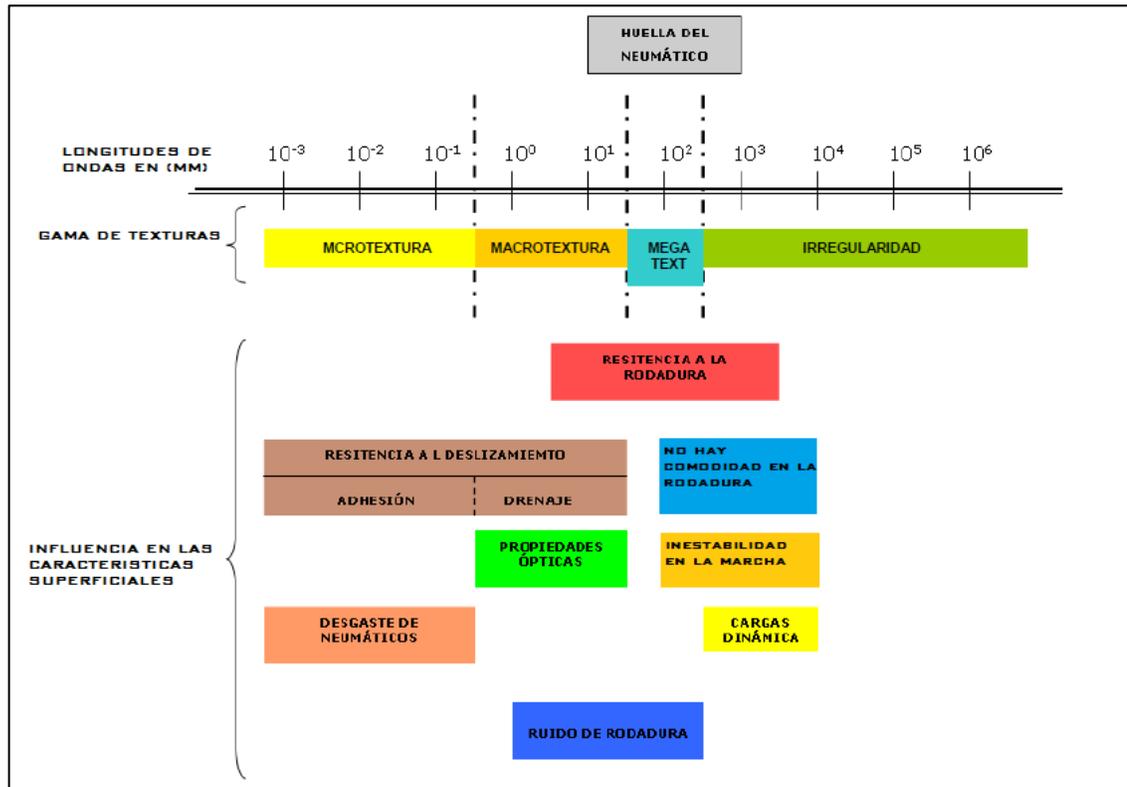


Figura 4.3 Clasificación de la Textura según AIPCR e Influencia en las características superficiales

El pliego de descripciones técnicas PG-3 en su artículo 542 “Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso “de la orden circular 24/2008, establece que la superficie de una carpeta asfáltica deberá presentar una textura homogénea.

La Macrotextura o rugosidad de la superficie de un pavimento depende de la granulometría y en especial del tamaño máximo nominal del agregado pétreo de la mezcla, lechada bituminosa, o del acabado superficial del hormigón (figura 4.4). La Macrotextura se define por sus intervalos de las longitudes de onda que están comprendidas como ya se mencionó anteriormente entre 0.5 y 50 mm. Esta es necesaria para una adecuada resistencia al deslizamiento a velocidades superiores a los 60 km/h o con el pavimento mojado. En condiciones climáticas

adversas como en temporadas de lluvias la Macrotextura permite mejorar la adherencia debido a la interacción que se da entre el neumático del automóvil y las partículas del agrado pétreo que sobresale del pavimento, facilitando además la eliminación del agua interpuesta entre el neumático y la capa de rodadura.



Figura 4.4 Ejemplo de Macrotextura de un pavimento

La Macrotextura tiene una pequeña influencia negativa en el consumo de combustible al aumentar la resistencia a la rodadura. En cambio mejora la visibilidad al producir una reflexión difusa de la luz de los faros cuando el pavimento se encuentra mojado y reduce las proyecciones del agua. Permite también un mejor contraste de las marcas viales. Además, influye en gran medida a la generación de sonido por la interacción del neumático con la capa de rodadura.

Resulta necesario realizar una distinción entre Macrotextura positiva y negativa la Macrotextura positiva es la más usual, típica, por ejemplo, de los tratamientos superficiales, las mezclas bituminosas cerradas y hormigones densos, la Macrotextura negativa se presenta en los pavimentos porosos y en los

microaglomerados de granulometría discontinua. Son muy diferentes en relación al ruido, mientras que con la positiva se puede aumentar o disminuir el ruido de rodadura según las dimensiones de las irregularidades, la negativa puede llegar a disminuir sensiblemente el nivel de ruido, no solo entre el contacto del neumático y el pavimento, si no también, por absorción acústica.

4.1.1.6. Influencia de la Macrotextura

Un aspecto muy importante en la seguridad vial, es el nivel de agarre o rozamiento que experimenta el neumático del vehículo con la carretera. A mayor nivel de rozamiento, mayor es la fuerza que trata de oponerse al deslizamiento del vehículo, lo cual es necesario por ejemplo cuando el conductor debe tomar una curva a una velocidad moderada en carreteras principales, redondeles o retornos, o cuando debe realizar una frenada de emergencia. Por otro lado, pavimentos con nivel de rozamiento bajo brindan condiciones inseguras para los usuarios, siendo el derrape o pérdida del control del vehículo la causa común de accidentes en rutas que presentan esta condición. Como se deriva de lo anterior, mantener un valor mínimo de rozamiento de la superficie es vital para conservar las condiciones de servicio y seguridad normales de una vía. Varios países cuentan con estudios que relacionan los bajos niveles de rozamiento de un tramo vial con índices más elevados de ocurrencia de accidentes; lo cual indica que se deben mejorar los niveles de rozamiento para reducir la cantidad de accidentes y los gastos asociados con estos.

El nivel de rozamiento de la superficie depende de varios factores, siendo los principales la macro textura y la micro textura de la mezcla asfáltica utilizado en la vía. La macro textura se relaciona directamente con el tipo de agregado expuesto en la mezcla obtenida; y afecta directamente la capacidad de drenaje del agua en

la superficie de la vía. A mayor Macrotextura, mejor esta capacidad, pero en detrimento del desgaste de los neumáticos de los vehículos que por dicha ruta circulan.

A menor Macrotextura, menor la capacidad de drenaje de la carretera, que ante ciertas condiciones de cantidad de agua superficial y velocidad de los vehículos produce el fenómeno llamado hidropneumático: la llanta no se encuentra en contacto directo con la superficie, sino que entre ambos se forma una pequeña película de agua, lo que conlleva a la pérdida del control del vehículo al maniobrar. Por otra parte, la microtextura depende directamente de la superficie del agregado expuesto en la mezcla, y es la que brinda la adhesión entre este agregado y la llanta. La piedra con poca resistencia o que se pule fácilmente con el paso del tránsito (como por ejemplo el agregado calizo) es por tanto poco apta para utilizarla en mezclas usadas en superficies de ruedo.

4.1.1.7. Amplitud de onda de la Macrotextura

El perfil del pavimento se describe por el desplazamiento a lo largo de su superficie y por el desplazamiento en dirección normal a ella. Aquí se llama distancia al primero y amplitud o profundidad (TD) al segundo. La distancia puede medirse en sentido longitudinal o transversal respecto a la dirección de la marcha, o en cualquier inclinación intermedia. Se define la longitud de onda de textura como la distancia mínima existente entre partes de la curva que se repiten periódicamente en dirección longitudinal al plano del pavimento (ver Figura 4.5).

4.1.1.8. Profundidad de la Textura

En un análisis tridimensional, el término profundidad de textura (TD) es, para un área similar a la de contacto con el neumático, la distancia media entre la superficie del pavimento y un plano que pase por los tres vértices más altos y claramente espaciados" de dicha superficie.

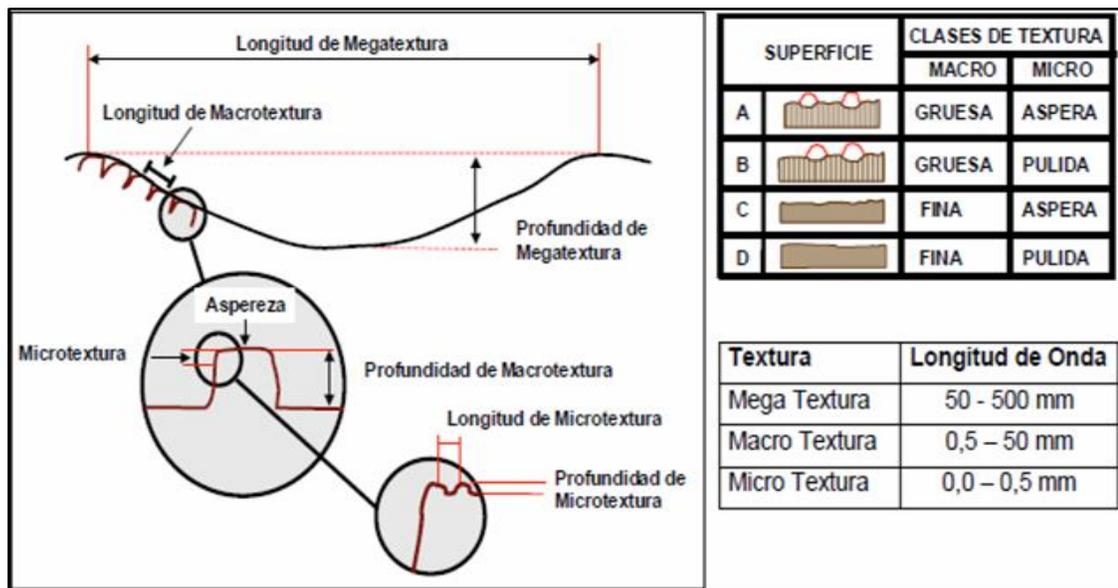


Figura 4.5 Tipos de Textura de un Pavimento,
Fuente: (PIARC, 1995; HIGHWAYS AGENCY, 1999A).

4.2. TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DE LA MACROTEXTURA

Sabiendo que la Macrotextura es dependiente de la distribución espacial y tamaño de las partículas del agregado de la superficie del pavimento, así como del material en donde dicho agregado se encuentra embebido, las técnicas de medición normalizadas por los estándares internacionales para medición de la

Macrotextura que tienen en cuenta las anteriores consideraciones, se agrupan de la siguiente manera:

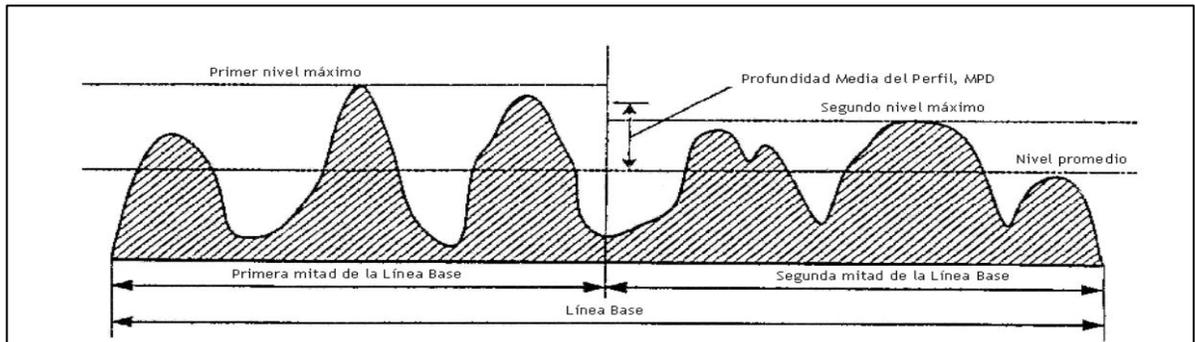
- Técnicas Volumétricas

- Técnicas Perfilométricas

4.2.1. Técnicas Volumétricas

El método de la mancha de arena, método ASTM E-965 (ASTM 2006), es un procedimiento que consiste en la aplicación cuidadosa de un volumen conocido de material sobre la superficie y el posterior cálculo de la profundidad de textura a partir de la medición del diámetro promedio formado por la mancha de material esparcido. La arena utilizada tiene una granulometría especificada en el método.

Este método proporciona un valor que se conoce como Profundidad de Textura Media (Mean Texture Depth, MTD), el cual es considerado independiente de las características de la microtextura del pavimento. La expresión con la que se calcula el MTD es volumen dividido por área de la mancha. El método de la mancha de arena se ha utilizado por muchos años, pero es lento y en cierta medida es subjetivo, pues existe variabilidad en la forma de esparcir la arena y medir el diámetro de la mancha que hace que las mediciones entre un operador y otro arrojen diferentes resultados. Esto ha impulsado en los últimos años la aparición de técnicas Perfilométricas.



**Figura 4.6 Definición de la profundidad media de perfil, "Mean Profile Depth" MPD.
Fuente: ASTM 2005**

4.2.2. Técnicas Perfilométricas

Son procedimientos basados en la determinación de la geometría del perfil o la superficie. Entre estos figuran el Circular Track Meter (CTmeter), el Laser Texture Scanner (LTS), y los perfilómetros láser de alta velocidad. El valor MTD que se obtiene de la mancha de arena se ha correlacionado empíricamente con mediciones directas del perfil, a las mediciones directas del perfil se les ha llamado MPD, por profundidad media de perfil (Mean Profile Depth, MPD). El MPD se calcula de acuerdo al método ASTM E-1845 (ASTM 2005a) a partir del promedio de las profundidades medidas en las dos mitades de un segmento de 10cm (ver Figura 4.6). Un esquema de cómo se usan los sensores láser para determinar la Macrotextura se muestra en la Figura 4.7.

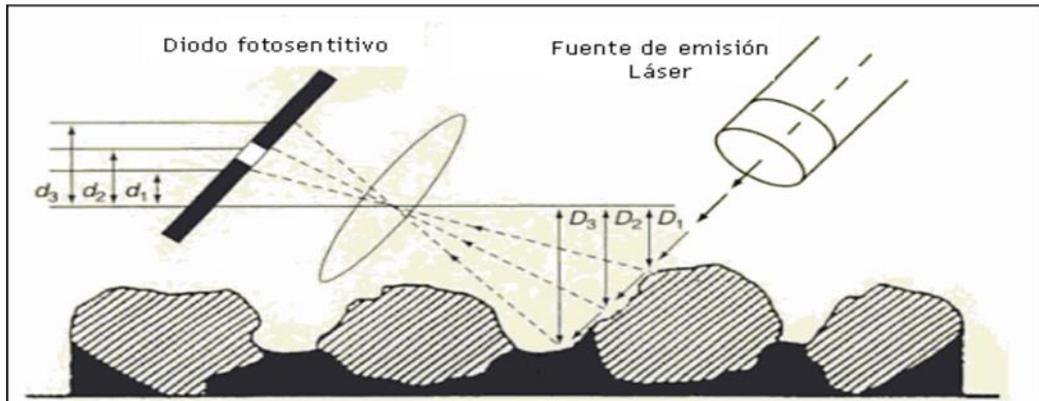


Figura 4.7 Principio de la medición de la profundidad de la Textura con dispositivo laser-Fuente: (Fuente: Whiteoak & Read 2003)

Los valores de MPD y MTD difieren debido al tamaño finito de granos usados en el ensayo de la mancha de arena y porque el MPD se deriva de un perfil bidimensional en lugar de una superficie tridimensional; por consiguiente una ecuación de la transformación debe usarse para relacionarlos.

4.3. EVALUACION DE LA MACROTEXTURA CON EL TIEMPO

Cada tipo de pavimento tiene un valor natural de textura. El valor natural corresponde al pavimento recién ejecutado y está asociado con el tipo de capa que se trate, con el tamaño de los áridos empleados y con el procedimiento de fabricación y extendido. Con el tiempo a consecuencia del desgaste del pavimento por los vehículos la textura va modificando su valor inicial de la siguiente forma.

Transversalmente al sentido de avance la textura en la zona de rodada y en el centro del carril se van diferenciando. Mientras en el centro del carril apenas se modifica el valor inicial, en la zona de rodada va disminuyendo. La magnitud de la diferencia (a veces muy significativa) es un índice de la edad del pavimento y/o de su comportamiento. Por ejemplo, se ha observado que los pavimentos de corta edad (2-3 años) que presenten diferencias acusadas entre el valor de textura

obtenida en el centro del carril y en la zona de rodadas, tienen a corto plazo un deterioro importante, mayor de lo habitual y probablemente también es una señal de fisuración próxima (prefisuración).

Longitudinalmente la velocidad evolución de la textura es función del valor inicial (valores iniciales pequeños disminuyen más despacio que valores iniciales más elevados). Con el paso del tiempo tanto las texturas bajas (0.3 - 0.7 mm) como las elevadas (0.7-2.0 mm) decrecen hasta un valor mínimo (que corresponde al momento de máximo desgaste, sin pérdida de estructura, pérdida que comienza con la suelta de áridos).

A partir de ese mínimo la Macrotextura comienza a crecer (sin que ese crecimiento tenga un significado positivo de recuperación) y tiende a hacerlo muy rápidamente hasta que se alcanza un máximo a partir del cual ya no tiene sentido hablar de Macrotextura de la capa, pasando a formar parte de la Megatextura, que presentará valores elevados por formación de “nidos de pollo” o baches. En capas delgadas tipo lechada puede suceder que la pérdida de textura signifique la desaparición de la capa o por lo menos de sus efectos favorables, quedando al descubierto la capa inferior que fue cubierta con la capa delgada. Se puede decir que la capa de rodadura ha agotado su misión.

4.4. HIDROPLANEÓ Ó AQUIPLANING

El hidropilaneo se puede considerar como una de las características de las carreteras que más pueden llegar a afectar a los usuarios. El hidropilaneo (o Aquapilaning) está esencialmente asociado a la Macrotextura del pavimento. Ocorre cuando una película de agua separa la rueda de la superficie de la carretera (ver Figura 4.8). Este fenómeno depende de la velocidad y peso del

vehículo, de las características y estado de los neumáticos, de la Macrotextura y del espesor de agua en el pavimento. Aun que son muchas las variables que intervienen, la fundamental es la presencia de agua en el pavimento con una profundidad critica. Por tanto, el potencial de riesgo de una sección de carretera al hidropneado viene determinado por la existencia de profundidades críticas que suelen ocurrir durante inundaciones y lluvia intensas repentinas.

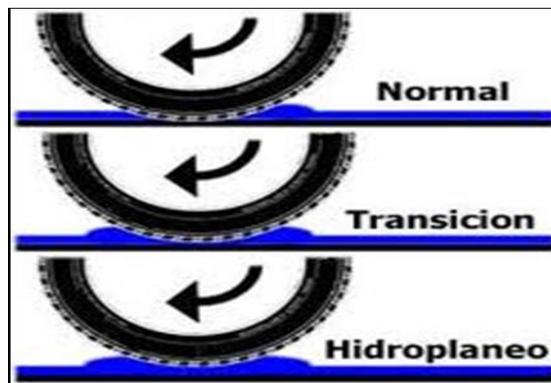


Figura 4.8 Efecto de la película de Agua sobre el contacto neumático-pavimento, Fuente: Ver <http://pulsar180.com/main/modules.php>

El riesgo de hidropneado de cada tramo de carretera se determina estudiando la topografía del pavimento: su geometría (radio y pendiente), el peralte y la Macrotextura que determinan la capacidad del mismo para evacuar el agua. El espesor de película de agua sobre el pavimento es función directa de la cantidad de agua, de la intensidad y duración de la precipitación (lluvia torrencial repentina) e inversa de la capacidad de drenaje del pavimento. La capacidad de evacuación de un pavimento se reparte entre: el drenaje por infiltración (drenaje a través del pavimento) y el drenaje por escorrentía (agua que escurre longitudinal y transversalmente hacia el arcén). En casi todos los tipos de pavimento el agua infiltrada es mínima, excepto en los diseñados específicamente para infiltraciones elevadas (mezclas porosas). El drenaje por infiltración depende de la Macrotextura

del pavimento (valor que también afecta al drenaje de escorrentía), de las pendientes longitudinal y transversal y de las depresiones de la superficie que forman valles que disminuyen o impiden el drenaje normal (como es el caso de las roderas).

El hidroplaneo es la separación entre el neumático y el pavimento producida por la presión del agua existente debajo de la rueda. El tanto por ciento de hidroplaneo viene dado por la ecuación:

$$\% \text{ de Hidroplaneo} = \frac{\text{Area dinámica de la huella}}{\text{Area estática de la huella}}$$

El hidroplaneo es una de las características que más pueden afectar a los usuarios, ésta depende principalmente de:

- La velocidad y el peso del vehículo
- Las características y estado de los neumáticos
- La Macrotextura del pavimento y de espesor del agua sobre el pavimento.

4.4.1. Presencia de agua en el pavimento

Cuando el pavimento se encuentra seco, la superficie de contacto entre el neumático y el pavimento es mucho mayor que cuando una superficie tiene presencia de agua (ver figura 4.8). Las condiciones existentes en la superficie de contacto entre el neumático y el pavimento mojado es la siguiente:

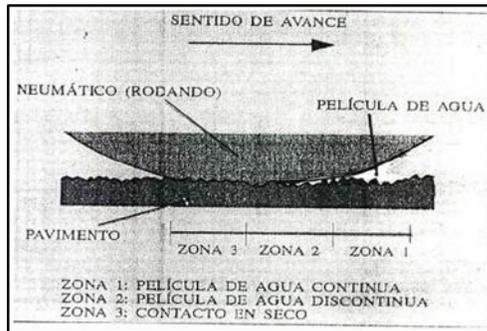


Figura 4.9 - Contacto entre neumático y pavimento mojado, Fuente: Adherencia en pavimentos flexibles, Ibagué 2011, Esteban Trujillo

Como se aprecia en la figura 4.9, la superficie de contacto entre el neumático y el pavimento se divide en tres zonas:

- **Zona 1:** el agua es evacuada progresivamente por los dibujos de la goma y por la Macrotextura del pavimento, la fricción es prácticamente nula.
- **Zona 2:** es esta parte queda una cantidad de agua a evacuar y el neumático empieza a tener contacto con las irregularidades del pavimento.
- **Zona 3:** el neumático está en contacto seco, la adherencia está desarrollada en esta verdadera zona de contacto. Al aumentar el espesor de la película de agua, la zona 3 se vería disminuida, aumenta la zona 1 y por tanto se reduce la adherencia. Para que el agua se pueda eliminar con una mayor rapidez que la que podría evacuar el dibujo del neumático se requiere de una Macrotextura gruesa.

En la zona 3 y parte de la zona 2 se requiere de una microtextura áspera de tal manera que logre atravesar la película delgada de agua y produzca puntos secos

de contacto. El hidroplaneo es conocido como la pérdida de control de un conductor debido al espesor de la película de agua que se encuentra la calzada debido a que los neumáticos pierden contacto con la superficie del pavimento. Esto se debe principalmente a la presencia de texturas muy finas que no dan tiempo de evacuar el pavimento.

4.5. CALCULO TEÓRICO DE LA MACROTEXTURA (NCHRP₁₀₈)

Se han realizado varios estudios para intentar modelar la profundidad de textura de la carpeta asfáltica o superficie de rodadura de un pavimento en función de sus características como la graduación de los agregados pétreos, tamaño máximo nominal de los agregados pétreos y las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

La National Cooperative Highway Research Program **NCHRP₁₀₈** (2009, pp. 108-120) presenta tres modelos o estudios particulares que podrían ser considerado para el uso en la evaluación macro-textura de las mezclas asfálticas diseñadas en laboratorio, pero para esta investigación en particular se tomaran solamente dos ellos.

4.5.1. Informe 441 NCHRP (Stroup-Gardiner y Brown, 2000)

El siguiente modelo predice un estimado de la profundidad media de la textura (ETD) en función del tamaño máximo nominal de agregado y la graduación del agregado pétreo. Como también se muestra, los tamaños de los tamices asociados con el porcentaje que pasa (10, 30, y 60) y que se utilizan para calcular los coeficientes de curvatura y el coeficiente de uniformidad **Cc** y **Cu**.

$$\text{EMTD} = 0.0198 \times \text{MS} - 0.004984 \times \text{P200} + 0.1038 \times \text{Cc} + 0.004861 \times \text{Cu}$$

Dónde:

EMTD= Estimado de la profundidad media de textura

MS = Tamaño máximo de agregados en mm

PS 200= Porcentaje que pasa por el **Tamiz N°200**

C_c = Coeficiente de Curvatura

C_u= Coeficiente de Uniformidad

Los coeficientes se calculan de la siguiente manera:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Dónde:

D₁₀ = Tamaño de tamiz asociado con el 10% que pasa, en mm.

D₃₀ = Tamaño de tamiz asociado con el 30% que pasa, en mm.

D₆₀ = Tamaño de tamiz asociado con el 60% que pasa, en mm.

4.5.2. MPD en el Virginia inteligente Road-(Davis, 2001)

Para la obtener la fórmula de este método fue utilizando un perfilador láser y se analizó la Macrotextura de acuerdo a las propiedades de la mezcla del pavimento para determinar qué propiedades tienen el mayor efecto sobre MPD. La ecuación

resultante del análisis de regresión se proporciona a continuación. El coeficiente de regresión para la ecuación fue 0,9724, lo que indica un ajuste excelente.

$$\text{MPD} = -3.596 + 0.1796 \times \text{NMS} + 0.0913 \times \text{P200} - 0.0294 \times \text{VTM} + 0.1503 \times \text{VMA}$$

Dónde:

MPD = profundidad media del perfil

NMS = Tamaño máximo nominal del agregado

P200 = Porcentaje que pasa por el tamiz No. 200 (4.75 mm).

VTM = Total de huecos en la mezcla.

VMA = Los vacíos en el agregado mineral.

4.6. DETERMINACIÓN DE LA MACROTEXTURA TEÓRICA

El gráfico de la granulometría combinada (ver figura 4.7) de los agregados utilizados se muestra para verificar que todos los valores estén en el rango de graduación de la banda "C" que se utilizó para el diseño de la mezcla asfáltica (tabla 4.1). El cual es el resultado de la Macrotextura teórica a nivel de laboratorio y se procede de la siguiente manera:



Constructora
DISA S.A. de
C.V.

**MEZCLA DE AGREGADOS PÉTREOS
PARA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE**

Planta Asfáltica
DISA
Quezaltepeque

Agregados Pétreos										
No.	Nombre	G.E. Bulk	Porcentaje	Descripción	Procedencia					
1	Grava 3/4"									
2	Grava 1/2"									
3	Arena Triturada									
Mezcla de Agregados Pétreos										
Malla		Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arena Triturada	Mezcla de Agregados	SIECA 703-8 Graduación C		Tol.	Formula de Trabajo	
NOMBRE	mm	17.00 %	23.00 %	60.00 %	100.00 %	Mín.	Máx.		Mín.	Máx.
1"	25.00	100.0	100.0	100.0	100.0					
3/4"	19.00	99.23	100.00	100.0	99.9	100	100		97	100
1/2"	12.50	35.53	87.8	100.0	86.2	97	100	±5	81	91
3/8"	9.50	9.8	63.21	100.0	76.2			±6	70	82
No. 4	4.75	3.14	6.8	94.0	58.5			±7	51	65
No. 8	2.36	1.97	3.32	69.5	42.8			±5	37	47
No. 16	1.18	1.59	2.11	49.2	30.3				24	34
No. 30	0.60	1.34	1.50	34.3	21.1			±4	17	25
No. 50	0.30	1.10	1.18	22.7	14.1			±3	11	17
No. 100	0.15	0.85	0.95	14.6	9.1				5	12
No. 200	0.075	0.57	1.0	9.1	5.8	3	8	±2	4	8

Tabla 4.1 Granulometría combinada del Diseño de la mezcla Asfáltica de TMN 3/4", Laboratorio de Constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, La Libertad, Fuente: Presentación de los autores

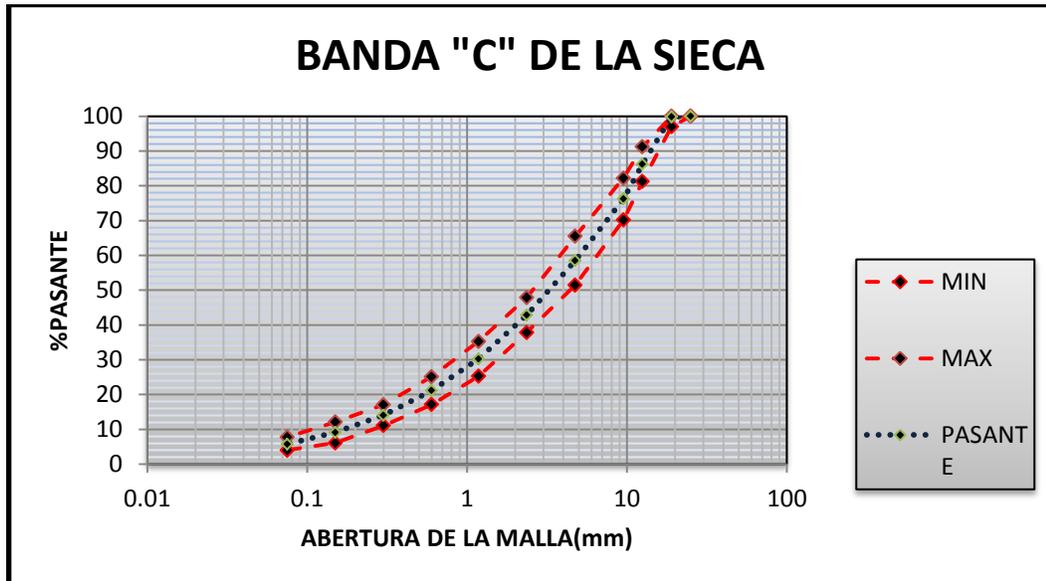


Figura 4.10 Gráfico Granulometría combinada del diseño de mezcla TMN $\frac{3}{4}$, Banda "C" de la SIECA, Fuente: Presentación de los autores, Laboratorio de Constructora DISA S.A. de C.V. Quezaltepeque, La Libertad,

4.6.1. Método NCHRP - Informe 441 (Stroup-Gardiner y Brown, 2000)

Este método solo produce un estimado y no es adecuado para la evaluación de la profundidad media de la textura a nivel de laboratorio debido a que presenta altos niveles de imprecisión.

Después de haber obtenido la fórmula de trabajo, es decir la combinación de agregados pétreos que cumple con la especificación de la banda "C" de la Tabla 3.11 (Rangos requeridos de Granulometría de agregados para concreto asfáltico en caliente) del Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales 2da. Edición Marzo de 2004 de la **SIECA** (Secretaría de Integración Económica Centroamericana) y verificar que esta cumple con la especificación, se procede al cálculo del coeficiente de curvatura y de uniformidad **Cc** y **Cu** respectivamente.

De la Tabla 4.1 obtenemos por interpolación los tamaños de los Tamices **D₁₀**, **D₃₀** y **D₆₀**

$$D_{10} = 0.15\text{mm} + \left(\frac{(0.3\text{mm} - 0.15\text{mm})}{(0.141 - 0.091)} \right) * (0.10 - 0.091) = 0.177\text{mm}$$

$$D_{30} = 0.60\text{mm} + \left(\frac{(1.18\text{mm} - 0.60\text{mm})}{(0.303 - 0.211)} \right) * (0.30 - 0.211) = 1.161\text{mm}$$

$$D_{60} = 4.75\text{mm} + \left(\frac{(9.5\text{mm} - 4.75\text{mm})}{(0.762 - 0.585)} \right) * (0.60 - 0.585) = 5.152\text{mm}$$

Pasamos a cálculo de los coeficientes **C_c** y **C_u**:

$$C_c = \frac{(1.161)^2}{5.152 * 0.177} = 1.478$$

$$C_u = \frac{5.152}{0.177} = 29.107$$

Luego de encontrar los coeficientes **C_c** y **C_u** se procede a sustituirlo en la fórmula del EMTD, teniendo en cuenta el porcentaje que pasa el tamiz#200 y TMN del agregado pétreo, encontrando de esta manera estimado de la profundidad media de la textura.

$$\text{EMTD} = 0.0198 \times \text{MS} - 0.004984 \times \text{P200} + 0.1038 \times \text{Cc} + 0.004861\text{Cu}$$

$$\text{MS} = 19.05 \text{ mm}$$

$$\text{PS200} = 0.058$$

$$\text{Cc} = 1.478$$

$$\text{Cu} = 29.107$$

$$\begin{aligned}\text{EMTD} &= 0.0198 \times (19.05\text{mm}) - 0.004984 \times (0.058) + 0.1038 \times (1.478) + 0.004861 \times (29.107) \\ &= 0.672\end{aligned}$$

$$\text{EMTD} = 0.672$$

4.6.2. Método (Davis, 2001) MPD en el Virginia inteligente Road

Este método es el más preciso para el cálculo de la profundidad media de la textura (MPD) debido a que en su fórmula influye no solo características granulométricas de los agregados utilizados para el diseño de la mezcla, sino también los vacíos en el agregado (VMA) y el porcentaje de vacíos de la mezcla, por lo cual es el método más idóneo para la evaluación de la Macrotextura a nivel de laboratorio.

$$\begin{aligned}\text{MPD} &= -3.596 + 0.1796 \times \text{NMS} + 0.0913 \times \text{P200} - 0.0294 \times \text{VTM} + 0.1503 \\ &\quad \times \text{VMA}\end{aligned}$$

Tomando en cuenta los parámetros del diseño de la mezcla:

$$\text{NMS} = 19.05 \text{ mm}$$

$$\text{P200} = 5.8\%$$

$$\text{VTM} = 4.0\%$$

$$\text{VMA} = 14.2\%$$

$$\begin{aligned}\text{MPD} &= -3.596 + 0.1796 \times (19.0) + 0.0913 \times (5.8\%) - 0.0294 \times (3.6\%) \\ &\quad + 0.1503 \times (13.9\%) = 2.338 \\ \text{MPD} &= 2.338\end{aligned}$$

4.7. EVALUACIÓN DE LA MACROTEXTURA POR MEDIO DEL MÉTODO DEL CÍRCULO DE ARENA

4.7.1. Descripción del método del círculo de arena

Este método de prueba es adecuado para pruebas de campo el cual determina el promedio del espesor de la Macrotextura de la superficie del pavimento. El conocimiento del espesor de la Macrotextura sirve como una herramienta en la caracterización de las texturas superficiales de los pavimentos.

Cuando se utiliza en conjunción con otras pruebas físicas, el espesor de la Macrotextura derivada de este método de prueba puede ser utilizado para determinar la capacidad de resistencia al deslizamiento de los materiales en pavimentos o la sugerencia de un mejor acabado. Cuando se utiliza con otras pruebas, se debe tener cuidado de que todas ellas se apliquen al mismo lugar. Se pueden obtener mejoras en la evaluación del acabado de pavimentos y planes de mantenimiento del uso de este método.

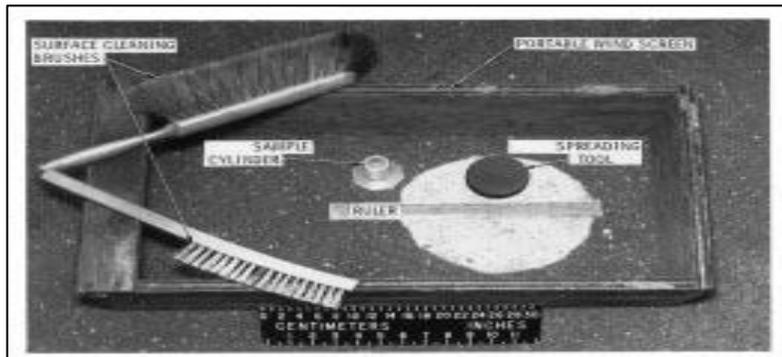


Figura 4.11 Equipo y Material utilizar según el método del Círculo de Arena
Fuente: ASTM E - 965

Las mediciones del espesor de las texturas producidas utilizando este método de prueba se ve influenciada por las características de la Macrotextura de la superficie. La forma de la partícula del agregado, tamaño y distribución son características de la textura superficial no tomada en cuenta en este procedimiento. Este método de prueba no intenta proporcionar una calificación completa de las características de la textura superficial.

Los valores del espesor de la Macrotextura superficial en el pavimento, determinados por este método, con el material y procedimientos establecidos aquí, no necesariamente concuerdan o se correlaciona directamente con otras técnicas de medición de textura superficial. Este método también es adecuado para propósitos de investigación y desarrollo, en donde se realizan comparaciones entre superficies de pavimento en la misma evaluación.

La superficie del pavimento a ser muestreado utilizando este método de prueba debe estar seca y libre de cualquier residuo de construcción, escombros superficiales, y partículas agregados sueltos que se pudieran remover o desplazar durante condiciones ambientales y de servicio normales.

4.7.2. Procedimiento

Los materiales y método de prueba estándar constan de una cantidad de material uniforme, un recipiente de volumen conocido, una pantalla adecuada para protección contra el viento, brochas para limpiar la superficie, un disco plano para dispersar al material sobre la superficie y una regla o cualquier otro dispositivo para determinar el área cubierta por el material. Se recomienda también una balanza de laboratorio para asegurarse de la consistencia de las mediciones de cada ensayo.

El procedimiento de prueba involucra la dispersión de un volumen conocido de material sobre una superficie de pavimento limpia y seca, la medición de dicha área cubierta, y subsecuentemente se calcula el promedio del espesor entre la parte inferior de los vacíos y la parte superior de los agregados. Esta medición del espesor de la textura superficial refleja las características de la Macrotextura.

En la dispersión del material especificado en este método, la superficie de los vacíos está completamente llena hasta los picos de las partículas circundantes. Este método de prueba no se considera conveniente para utilizarse en superficies estriados o pavimentos con vacíos grandes (≥ 1.0 pulg (25mm)).

Superficie de prueba. Debe inspeccionarse la superficie del pavimento por ser evaluada y seleccionarse un área seca y homogénea que no contenga características únicas o localizadas tales como grietas y juntas. Debe estar completamente limpia utilizando primeramente la brocha de alambre y posteriormente la brocha de cerdas suaves para remover cualquier residuo, escombros o partículas de agregado sueltas de la superficie. Colocar la pantalla contra viento alrededor de la superficie que se ha elegido para el ensayo.

Material de prueba: llena el volumen de material conocido con material seco, se golpea suavemente la base del cilindro varias veces sobre una superficie rígida.

Debe llenarse con material a utilizar para cada ensayo, hasta la parte superior del cilindro y nivelarse con una regleta. Si se dispone de una balanza, determine la masa del material en el cilindro y utilice esta misma masa de material de prueba en cada determinación.

Medición del ensayo. Se vierte el volumen del material en la superficie limpia dentro del área protegida por la pantalla contra viento. Luego se dispersa cuidadosamente al material en el parche circular con la herramienta de disco, con la parte cubierta con hule hacia abajo, llenando los vacíos superficiales hasta los picos de las partículas de agregados, también puede realizarse con una regleta.

Se mide y registra el diámetro del área cubierta por el material como mínimo de cuatro localizaciones igualmente espaciadas alrededor de la circunferencia de la muestra. Calcule y registre el diámetro promedio.

Número de mediciones de prueba. El mismo operador deberá desarrollar al menos cuatro mediciones del espesor de la Macrotextura, espaciadas aleatoriamente sobre un tipo de superficie de pavimento ensayado. El promedio aritmético de los valores de espesor de la Macrotextura se deben considerar como el promedio del espesor de la Macrotextura de la superficie del pavimento bajo estudio.

4.7.3. Equipo

- Material Esferas de vidrio sólido con 90% de redondez de acuerdo con el método de prueba ASTM D 1155 o podría utilizarse arena graduada de tal

manera que tengan un mínimo de 90% en peso que pase la malla No. 60 y se retenga en una No. 80. Recipiente de prueba. Se puede utilizar un recipiente cilíndrico metálico o de vidrio, con volumen interno predeterminado de al menos 1.5 pulgadas cúbicas (25,000 mm³), el cual se utilizará para determinar el volumen de arena dispersa.

- Herramienta de dispersión. Se deberá utilizar un disco plano duro de aproximadamente 1 pulgada (25 mm) de espesor y 2.5 a 3 pulgadas (60 a 75 mm) de diámetro para dispersar la arena. La parte inferior del disco deberá estar cubierta con un material de hule duro y se puede acoplar una asa conveniente a la parte superior del disco. O si no se cuenta con esta herramienta, puede ser remplazada por una regleta, lo suficientemente larga para abarcar el diámetro formado por la arena dispersa.
- Brochas. Se deberán utilizar una brocha de alambre y una de cerdas suaves se deberá utilizar para limpiar completamente a la superficie del pavimento antes de la aplicación del material de prueba.
- Pantalla contra viento. Se utiliza para proteger al material del viento y la turbulencia creada por el tráfico.
- Escala. Se deberá utilizar una escala estándar (regla o cinta métrica) de 12 pulg. (305 mm) o de longitud mayor que contenga divisiones de 0.1 pulg. (2.5mm) o 1mm (0.04 pulg.).

- Utilice una balanza de laboratorio, con sensibilidad de 0.1 g, se recomienda con este método de prueba para proporcionar un control adicional y para asegurar que la cantidad de material utilizado para cada medición del espesor de la Macrotextura es igual tanto en masa como en volumen.

4.7.4. Calculo

4.7.4.1. Volumen del cilindro

Se calcula el volumen interno del cilindro de prueba como sigue:

$$V = \frac{\pi d^2 H}{4}$$

V = Volumen interno del cilindro, pulg³ (mm³)

d = Diámetro del cilindro de prueba, pulg (mm)

H = Altura del cilindro, pulg (mm)

4.7.4.2. Espesor promedio

La profundidad media de la Macrotextura de la superficie del pavimento se encuentra utilizando la siguiente ecuación:

$$H = \frac{4V}{\pi d^2}$$

En donde:

H = promedio del espesor de la Macrotextura de la superficie, pulg (mm)

V = volumen de la muestra, pulg³ (mm³)

d = diámetro promedio del área cubierta por el material pulg, (mm)

Teniendo en cuenta el número de repeticiones que tiene que realizarse el ensayo de la mancha de arena por tramo para la evaluación de la Macrotextura según la norma ASTM E - 965, se elaboro la siguiente tabla 4.2.

Pruebas defectuosas

Las pruebas que son manifiestamente defectuosa o que dan significan textura valores de profundidad que difieran en más de 0,005 pulgadas (0,13 mm) de la media de todas las pruebas en la misma superficie del pavimento será tratados de acuerdo con la norma ASTM E-178.

Fecha							
Nombre del Proyecto							
Ubicación							
# de Tramo							
Tipo de Mezcla		TMN					
#Repeticiones	V. de Mat. en mm ³	Medidas del Diámetro en mm				Diámetro Promedio	MTD
		1	2	3	4		
1							
2							
3							
4							
Promedio							

**Tabla 4.2 Hoja de informe de la evaluación de la profundidad media de la Macrotextura en pavimentos diseñados con mezclas asfálticas densas producidos por DISA S.A de C.V.
Fuente: Presentación de los autores**

4.8. EVALUACION DE LA MACROTEXTURA EN CAMPO DE LA MEZCLA Densa Diseñada con TMN ¾"

El método de medición de la textura por medio del método del círculo de arena fue utilizado para las pruebas de campo que se realizaron en esta investigación, el cual proporciona el promedio del espesor de la Macrotextura de la superficie del pavimento flexible.

El conocimiento del espesor de la Macrotextura sirve como una herramienta en la caracterización de las texturas superficiales de los pavimentos. Las mediciones de la Profundidad de Textura Media (MTD), producidos utilizando este método de prueba, se ve influenciada por las características de la Macrotextura de la superficie tales como: La forma de la partícula del agregado, tamaño y distribución, en esta investigación se hace un estudio a la textura superficial de los pavimentos flexibles con un TMN de agregado de ¾". Este método de prueba no intenta proporcionar una calificación completa de las características de la textura superficial.

Los valores de la Profundidad de Textura Media (MTD) en el pavimento determinados por este método, se realizan con el material y procedimientos establecidos por la norma ASTM E-965, la cual establece un material sólido y uniforme con un 90% de redondez y un recipiente con un volumen conocido; para el desarrollo del ensayo se utilizó arena de Ottawa con graduación en peso, pasante de la malla #50 y retenido en la malla #100. Este método también es adecuado para propósitos de desarrollo, en donde se pueden realizar comparaciones entre superficies de pavimento en la misma evaluación.

Se deberá desarrollar al menos cuatro mediciones del MTD, espaciadas aleatoriamente sobre un tipo de superficie de pavimento ensayado o tramo seleccionado. El promedio aritmético de los valores del MTD en el tramo de

estudio se debe considerar como el promedio del espesor de la Macrotextura de la superficie del pavimento bajo estudio.

El procedimiento de la evaluación a los pavimentos flexibles por medio de este método se presenta y se describe de una manera clara y ordenada siguiendo los pasos que el método proporciona.

Calculo del volumen del recipiente:

Siguiendo lo establecido en la norma ASTM E-965, el recipiente a utilizar en el ensayo puede ser de metal o de plástico, cilíndrico con un volumen interno predeterminado de no menos 1.5 pulg³ (25000 mm³), el cual se utilizará para determinar el volumen de propagación de arena.



Figura 4.12 Recipiente Cilíndrico para ensayo de la mancha de arena
Fuente: Presentación de los autores

Medidas del Recipiente cilíndrico:

Altura = 26.34 mm

Diametro = 42.5 mm

V = 37366.6 mm³

Conocido el volumen del recipiente a utilizar, el procedimiento de campo involucra la dispersión de un volumen conocido de material sobre una superficie de pavimento limpia y seca, inspeccionando que esta no contenga ninguna características de daño o imperfecciones, tales como grietas ó juntas y si es necesario limpiar con brocha de alambre y posteriormente con brocha de cerdas suaves, como se muestra en la figura 4.13.



Figura 4.13 Selección, Inspección y Limpieza de tramo a estudiar
Fuente: Presentación de los autores

Se procede, llenando el recipiente con volumen conocido con material seco, se llena hasta la parte superior del cilindro y nivela con una regleta (ver Figura 4.14).



Figura 4.14 Colocación del material en el recipiente, Fuente: Presentación de los autores

Vierta el volumen del material en la superficie, se dispersa cuidadosamente el material con la herramienta de disco generando un círculo o mancha de arena, llenando los vacíos superficiales hasta las puntas de las partículas de agregado en el pavimento (ver figura 4.15 y figura 4.16).



Figura 4.15 Colocación del material en la superficie del pavimento y generación de la mancha de arena, Fuente: Presentación de los autores.



Figura 4.16 Mancha de arena generada, Fuente: Presentación de los autores.

Se mide y registra el diámetro del área cubierta por el material como mínimo en cuatro localizaciones igualmente espaciadas alrededor de la circunferencia generada de la muestra con una regla graduada, para obtener y registrar un diámetro promedio como se muestra en la figura 4.17.



Figura 4.17 Medición y registro del diámetro promedio de la mancha de arena, Fuente: Presentación de los autores.

Para esta investigación se realizaron una serie de mediciones de la Macrotextura en pavimentos flexibles, las cuales fueron hechas en el proyecto Urbanístico "**San Gabriel**" carpeta asfáltica que la empresa **DISA S.A de C.V.** colocó, dicho proyecto ubicado en el km 55 de la carretera de Oro, Quezaltepeque, La Libertad.

Se realizaron pruebas a tres tramos en el cual se hicieron al menos cuatro mediciones, espaciados aleatoriamente como se establece en la norma ASTM E-965. Se eligió como tramo No 1 la calle principal del proyecto como lo muestra la figura 4.18.



Figura 4.18 Tramo # 1 en estudio, Fuente: Presentación de los autores.

Realizando el procedimiento de rutina para la evaluación de la Macrotextura en los tramos indicados (ver figura 4.19), siguiendo los pasos mostrados en la sección 4.8 pagina 169, se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla 4.3.



Figura 4.19 Proceso de toma de lecturas por medio del método del círculo de arena
Fuente: Presentación de los autores.

Fecha		20 de Agosto de 2014					
Nombre del Proyecto		San Gabriel					
Ubicación		Quezaltepeque					
# de Tramo		1					
Tipo de Mezcla		TMN ¾"					
#Repeticiones	V. de Mat. En mm ³	Medidas del Diámetro en mm				D. Promedio	MTD
		1	2	3	4		
1	37,366.6	250	245	230	237	240.5	0.822561078
2	37366.6	220	225	230	245	230	0.899378798
3	37366.6	235	242	248	235	240	0.825991986
4	37366.6	255	240	235	242	243	0.805723017
		Promedio				240.5	0.83841372

Tabla 4.3 Datos de MTD del tramo #1, Fuente: Presentación de los autores.

Para el cálculo del MTD promedio del tramo se realiza así:

Se evalúa cada una de las repeticiones tomando el valor del volumen de material conocido.

Para repetición No 1:

Se toman los valores de las 4 repeticiones y se promedia un valor que se tomara como referencia de dicha lectura:

$$D_{\text{prom}} = 250 + 245 + 230 + 237 = 240.5$$

Con el diámetro promedio de la mancha de arena calculado se aplica la formula

$MTD = \frac{4V}{\pi D^2}$ para cada lectura tomada:

$$MTD = \frac{4(37366.6)}{\pi(240.5)^2} = 0.8225 \text{ mm}$$

$$MTD = \frac{4(37366.6)}{\pi(230)^2} = 0.8993 \text{ mm}$$

$$MTD = \frac{4(37366.6)}{\pi(240)^2} = 0.8259 \text{ mm}$$

$$MTD = \frac{4(37366.6)}{\pi(243)^2} = 0.8057 \text{ mm}$$

Se obtienen los datos de las lecturas de igual manera:

$$MTD = 0.8993 \text{ mm}$$

$$MTD = 0.8259 \text{ mm}$$

$$MTD = 0.8057 \text{ mm}$$

Se obtiene un MTD promedio de primer tramo evaluado sumando los valores de cada repetición y dividiéndolo entre el número de repeticiones:

$$\text{MTD} = 0.8225 + 0.8993 + 0.8259 + 0.8057 = 0.8384 \text{ mm}$$

$$\text{MTD} = 0.8384 \text{ mm}$$

Los datos del tramo No 2 "Cluster San Gabriel Sur", ver figura 4.20 se muestran en la tabla 4.4



Figura 4.20 Tramo No 2 "Cluster San Gabriel Sur" y proceso de medición en el tramo II, Fuente: Presentación de los autores.

Fecha:	21 de Agosto de 2014						
Nombre del Proyecto:	San Gabriel						
Ubicación:	Quezaltepeque						
# de Tramo:	No 2 Closter San Gabriel Sur						
Tipo de Mezcla:	TMN 3/4"						
# Repetición	V. de Mat. En mm ³	Medidas del Diámetro en mm				D. Promedio	MTD
		1	2	3	4		
1	37,66.6	225	222	230	225	225.5	0.93563234
2	37366.6	230	235	220	225	227.5	0.919253972
3	37366.6	210	208	215	220	213.25	1.046213302
4	37366.6	228	215	220	220	220.75	0.976330581
PROMEDIO						221.75	0.969357549

Tabla 4.4 Datos del MTD Tramo No 2, Fuente: Presentación de los autores.

Los datos del tramo No 3 "Cluster San Gabriel Norte" ver figura 4.21, se muestran en la tabla 4.5.



Figura 4.21 Tramo No 3 "Cluster San Gabriel Norte" y proceso de medición en el tramo III, Fuente: Presentación de los autores.

Fecha:	20 de Agosto de 2014						
Nombre del Proyecto:	"San Gabriel"						
Ubicación:	Quezaltepeque						
# de Tramo:	No 3 Closter San Gabriel Norte						
Tipo de Mezcla:	TMN 3/4"						
# Repeticiones	V. de Mat. En mm ³	Medidas del Diámetro en mm				D. Promedio	MTD
		1	2	3	4		
1	37,366.6	225	220	235	240	230	0.8993788
2	37,366.6	228	225	240	237	232.5	0.8801413
3	37,366.6	240	238	230	229	234.25	0.86704
4	37,366.6	230	235	240	240	236.25	0.8524221
PROMEDIO						233.25	0.8747

Tabla 4.5 Datos del MTD Tramo No 3, Fuente: Presentación de los autores.

CAPITULO V

ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

CAPITULO V

5. ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados en el plantel de la empresa DISA S.A. de C.V, en base al MANUAL CENTROAMERICANO DE ESPECIFICACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES REGIONALES de (SIECA), 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, utilizando granulometrías que cumplen con las especificaciones establecidas en normas tanto de la AASTHO, como su equivalente en 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.

5.1. 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 caliente, se plantea a continuación el análisis e interpretación (comparación con criterios normados) para cada ensayo.

5.1.1. Análisis granulométrico

Efectuadas las pruebas granulométricas de las diferentes muestras de agregados pétreos (grava $\frac{3}{4}$ ", grava $\frac{1}{2}$ " y arena triturada), es importante analizar e interpretar los resultados obtenidos, estos se comparan con los criterios señalados en la SIECA, la cual establece los límites de las granulometrías para los agregados empleados en este diseño. En la tabla 5.1 se presentan los rangos requeridos de las gradaciones para los agregados pétreos.

TAMIZ		Porcentaje de masa pasando, Designación de Tamices (AASHTO T 27 y AASHTO T 11)					
		Designación de la Graduación					
		A	B	C	D	E	F
37.5mm	1½ pulg.	100					
25 mm	1 pulg.	97-100	100	100			
19 mm	¾ pulg.	-	97-100	97-100	100	100	
12.5 mm	½ pulg.	-	76-88(5)	81-91	97-100	97-100	
9.5 mm	⅜ pulg.	53-70(6)	-	70-82	-	*(5)	100
4.75 mm	No 4	40-52(6)	49-59(7)	51-65	57-69(6)	*(6)	33-47(6)
2.36 mm	No 8	25-39(4)	36-45(5)	38-48	41-69(6)	*(6)	7-13(4)
600µ	No 30	12-22(4)	20-28(4)	17-25	22-30(4)	*(4)	-
300 µ	No 50	18-16(3)	13-21(3)	11-17	13-21(3)	*(3)	-
74 µ	No 200	3-8(2)	3-7(2)	4-8	2-8(2)	3-8(2)	2-4(2)

Tabla 5.1 Rangos requeridos de las graduaciones de agregado pétreo, FUENTE: Manual Centro Americano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales. SIECA.

El agregado pétreo a utilizar deberá presentar una gradación que cumpla con una de las granulometrías mostradas en el tabla 5.1. En el presente diseño se emplearon los límites establecidos en la granulometría de la columna C para el análisis de la grava 3/4".

La tabla 5.2 se presenta el resumen de la granulometría realizada a la muestra de grava de ¾".

RESUMEN GRANULOMETRICO DE GRAVA ¾"			
MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje que Pasa
NOMBRE	mm		
1 1/2"	37.50	0.00 g	100.00 %
1"	25.40	0.00 g	100.00 %
3/4"	19.00	38.10 g	99.2 %
1/2"	12.50	3,146.60 g	35.3 %
3/8"	9.50	1,272.30 g	9.5 %
No. 4	4.75	327.90 g	2.8 %
No. 8	2.36	57.60 g	1.6 %
No. 16	1.18	19.00 g	1.3 %
No. 30	0.60	12.20 g	1.0 %
No. 50	0.30	12.20 g	0.8 %
No. 100	0.15	12.30 g	0.5 %
No. 200	0.075	13.40 g	0.2 %
FONDO		11.90 g	0.00 %
Grava 97.18%	Arena 2.57%	Finos 0.24%	Suma 100%

Tabla 5.2 Análisis granulométrico grava ¾"
Fuente: Presentación de los autores

Para la muestra de agregado de grava de ¾" 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.

En la tabla 5.3 se presenta el resumen de la granulometría realizada a la muestra de grava de ½"

MALLA		Porcentaje que Pasa
NOMBRE	mm	
1 1/2"	37.50	100.00 %
1"	25.40	100.00 %
3/4"	19.00	100.0 %
1/2"	12.50	87.8 %
3/8"	9.50	63.1 %
No. 4	4.75	6.7 %
No. 8	2.36	3.1 %
No. 16	1.18	1.9 %
No. 30	0.60	1.3 %
No. 50	0.30	1.0 %
No. 100	0.15	0.8 %
No. 200	0.075	0.6 %
FONDO		0.00 %

Tabla 5.3 Resumen de ensayo de granulometría de grava de 1/2"
Fuente: Presentación de los autores

Para la muestra de agregado grava 1/2" 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.

MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje que Pasa
NOMBRE	mm		
No. 4	4.75	59.60 g	93.5 %
No. 8	2.36	242.30 g	66.9 %
No. 16	1.18	201.70 g	44.9 %
No. 30	0.60	147.90 g	28.7 %
No. 50	0.30	115.10 g	16.1 %
No. 100	0.15	80.10 g	7.3 %
No. 200	0.075	54.60 g	1.3 %
FONDO			0.00 %

Tabla 5.4 Resumen de ensayo de granulometría de arena triturada
Fuente: Presentación de los autores

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.

Para desarrollar la combinación de los materiales se utilizará la banda de especificación tipo C . Después de haber combinado las 3 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.

En el cuadro 5.5 se muestra en resumen los resultados de la granulometría obtenida de la combinación de los materiales pétreos (Grava 3/4", grava 1/2" y arena triturada).

Malla		Grava 3/4"	Grava 1/2"	Arena Triturada	Mezcla de Agregados
NOMBRE	mm	17.00 %	23.00 %	60.00 %	100.00 %
1"	25.00	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	19.00	99.23	100.00	100.0	99.9
1/2"	12.50	35.53	87.8	100.0	86.2
3/8"	9.50	9.8	63.21	100.0	76.2
No. 4	4.75	3.14	6.8	94.0	58.5
No. 8	2.36	1.97	3.32	69.5	42.8
No. 16	1.18	1.59	2.11	49.2	30.3
No. 30	0.60	1.34	1.50	34.3	21.1
No. 50	0.30	1.10	1.18	22.7	14.1
No. 100	0.15	0.85	0.95	14.6	9.1
No. 200	0.075	0.57	1.0	9.1	5.8

Tabla 5.5 Resumen de ensayo de granulometría combinada
Fuente: Presentación de los autores

En la figura 5.1 se presenta la curva granulométrica de comprobación obtenida, donde todos los valores obtenidos están dentro de los límites de la especificación.

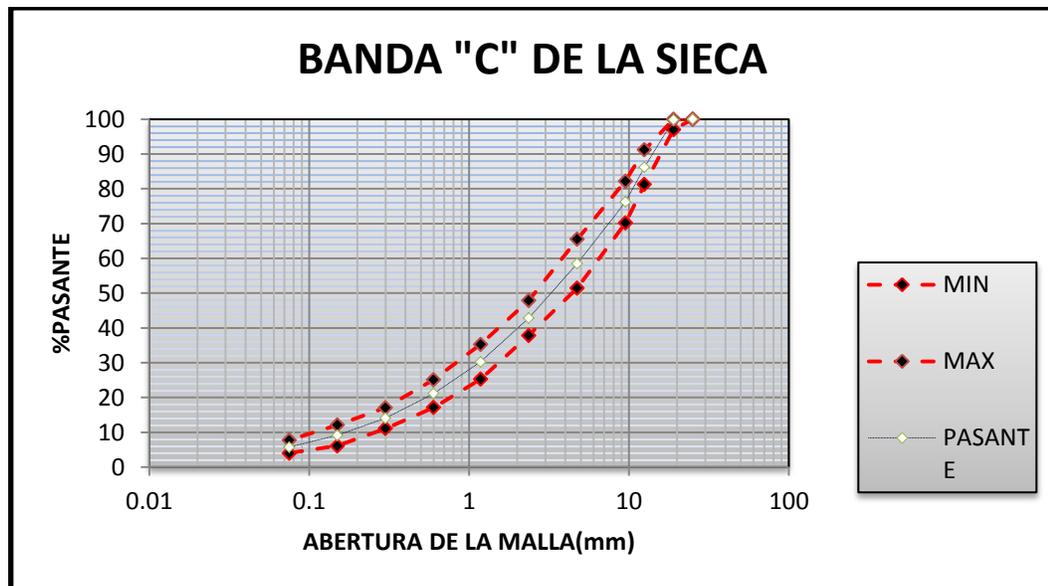


Figura 5.1 Análisis combinado de comprobación, Fuente: Presentación de los autores

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.

5.1.2. Análisis de resultados de ensayo gravedad específica y absorción del agregado grueso (AASHTO T 85-91)

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 $\frac{3}{4}$ " y grava $\frac{3}{8}$ ").

RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYO GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO				
DESCRIPCION	FORMULA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	VALOR PROMEDIO
PESO ESPECIFICO SECO	$A / (B - C)$	2214	2211.5	2583
PESO ESPECIFICO SATURADO CON SUPERFICIE SECA	$B / (B - C)$	2258.4	2256.3	2635
PESO ESPECIFICO APARENTE	$A / (A - C)$	1400.3	1401	2725
PORCENTAJE DE ABSORCION	$(B - A) / A$	2.01	2.03	2.02

Tabla 5.6 Resumen ensayo de gravedad específica y absorción del agregado de $\frac{3}{4}$ ", ver ensayo completo en Anexo 1.8, Fuente: Presentación de los autores.

RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYO GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO				
DESCRIPCION	FORMULA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	VALOR PROMEDIO
PESO ESPECIFICO SECO	$A / (B - C)$	2342.9	2,341.60 g	2.6
PESO ESPECIFICO SATURADO CON SUPERFICIE SECA	$B / (B - C)$	2388	2387	2.65
PESO ESPECIFICO APARENTE	$A / (A - C)$	1487	1486	2.73
PORCENTAJE DE ABSORCION	$(B - A) / A$	1.925	1.939	1.930

Tabla 5.7 Resumen ensayo de gravedad específica y absorción del agregado de $\frac{1}{2}$ ", ver ensayo completo en Anexo 1.9, Fuente: Presentación de los autores.

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.

5.1.3. Análisis 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 No 4 (4.75 mm). Tabla 5.8 que a continuación se presenta, describe en forma resumida los resultados obtenidos.

RESUMEN DE ENSAYO EQUIVALENTE DE ARENA	
1	61.70 %
2	61.70 %
PROMEDIO	61.70 %

Tabla 5.8 Resumen ensayo de equivalente de arena, ensayo completo en Anexo 1.4. Fuente: Presentación de los autores.

El valor del equivalente de arena de 61.70 %, será una herramienta más para la evaluación de la calidad de los materiales. La especificación AASHTO T-176 para este ensayo establece un valor de 35% mínimo, por ende el material puede ser utilizado en la mezcla asfáltica

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.

5.1.4. Análisis de propiedades volumétricas y mecánicas 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 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
- Gravedad Específica Bulk Vrs. Contenido de Asfalto
- Estabilidad en % Vrs. Contenido de Asfalto
- % VFA Vrs. Contenido de Asfalto
- Flujo Vrs. Contenido de Asfalto Residual

5.1.4.1. Estabilidad vrs. Contenido de asfalto

El valor de estabilidad Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente (inmediatamente deja de registrar carga). Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, las quijadas (cabezales) superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la briqueta aumenta al igual que la lectura en el indicador dial. Luego se suspende la carga una vez se obtiene la carga máxima. La carga máxima indicada por el medidor es el valor de Estabilidad Marshall.

Hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentan a medida que el contenido de asfalto aumenta. Más allá de este punto, la estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de asfalto entonces los valores de estabilidad entran en el rango que establece el MS No 22 del Instituto del Asfalto (ver figura 3.35, sección 3.10.1 pagina 119), los resultados se muestran en la tabla 5.9.

Punto del diseño	% de Asfalto	Tendencia de la estabilidad en kg
1	4.0	2.136
2	4.5	2.135
3	5.0	2.211
4	5.5	2.192
5	6.0	2.108

Tabla 5.9 Resumen datos de estabilidad, Fuente: Presentación de los autores.

5.1.4.2. Gravedad Específica Bulk Vrs. Contenido de Asfalto

Otro aspecto considerado en el estudio fue la Gravedad Especifica Bulk, una vez realizado el ensayo de las treinta (30) Briquetas que se elaboraron para todo el diseño, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 5.10.

Punto del Diseño	% de Asfalto	Tendencia de la G. E. Bulk
1	4.0	2.301
2	4.5	2.322
3	5.0	2.340
4	5.5	2.366
5	6.0	2.381

Tabla 5.10 Resumen de valores de la densidad bulk, Fuente: Presentación de los autores.

5.1.4.3. Flujo % Vrs. Contenido de Asfalto

Los valores de fluencia aumentan con aumentos en el contenido de asfalto, los valores de fluencia se muestran en la tabla 5.11

Punto del diseño	% de Asfalto	Tendencia del Flujo en mm
1	4.0	3.13
2	4.5	3.47
3	5.0	3.39
4	5.5	3.22
5	6.0	3.73

Tabla 5.11 Resumen de valores de fluencia, Fuente: Presentación de los autores.

5.1.4.4. Vacíos en el agregado mineral VMA % Vrs. Contenido de Asfalto

El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (%VMA) generalmente disminuye hasta un valor mínimo, y luego aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.

Punto del diseño	% de asfalto	Tendencia en % del VMA
1	4.0	14.878
2	4.5	14.544
3	5.0	14.332
4	5.5	13.835
5	6.0	13.737

Tabla 5.12 Resumen de valores del % VMA, Fuente: Presentación de los autores.

5.1.4.5. Vacíos llenos de asfalto % VFA Vrs. Contenido de Asfalto

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (%VFA) aumenta con incrementos en el contenido de asfalto.

Punto del diseño	% de asfalto	Tendencia en % del VFA
1	4.0	50.232
2	4.5	574.51
3	5.0	706.10
4	5.5	78.664
5	6.0	90.934

Tabla 5.13 Resumen de valores de % de VFA, Fuente: Presentación de los autores.

5.1.4.6. % Vacíos Vrs. Contenido de Asfalto

El porcentaje de vacíos totales en la muestra se puede apreciar que disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto.

Punto del diseño	% de asfalto	Tendencia % de vacíos
1	4.0	7.405
2	4.5	6.188
3	5.0	4.184
4	5.5	2.952
5	6.0	1.245

Tabla 5.14 Resumen de valores del % de vacíos, Fuente: Presentación de los autores.

5.1.5. RESULTADOS DEL DISEÑO MARSHALL

A partir de los gráficos que se muestran en la sección 3.10.1 paginas 127, 128, 129, se obtienen los valores finales para cada criterio establecido en las normas proporcionadas por el Manual de Series No 22 del Instituto del asfalto.

El contenido optimo de asfalto de 5.1% y los parámetros encontrados con este método de diseño, cumplen con los requerimientos para que esta dosificación de agregados $\frac{3}{4}$ " 17%, $\frac{1}{2}$ " 23% y arena 60%, que fue obtenida mediante las especificaciones sea reproducida en planta para su producción y utilización.

CRITERIOS PARA MEZCLAS POR EL MTODO MARSHALL	VALORES OBTENIDOS	TRANSITO PESADO CARPETA Y BASE	
		MINIMO	MAXIMO
Compactación, numero de golpes por cada cara de la probeta	-	75	75
Estabilidad Kg.	2208	816	-
Flujo mm	3.40	2	4
% Vacios	4.0	3	5
%VMA	14.2	Para un 4% de contenido de vacios se toma un valor mínimo de 13% para agregado de ¾"	
%VFA	72	65	75

Tabla 5.15 Parámetros del Diseño Marshall y resultados del Diseño, Fuente: Presentación de los autores.

En un diseño de mezcla asfáltica debe de existir una dosificación apropiada tanto de agregados como de asfalto, además la película de asfalto que recubre las partículas de agregado debe de tener un espesor adecuado, no debe ser ni muy delgada porque se envejecería rápido, esto sería un valor de VFA menor a 65%, ni muy gruesa porque ocasionaría exudación de asfalto en la mezcla compactada, esto equivaldría a un valor de VFA mayor que 75%.

5.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA MACROTEXTURA EN CAMPO

Como se puede observar en las tablas 5.16, 5.17 y 5.18 en donde se presenta una comparación entre la Macrotextura de las repeticiones por tramo y la Macrotextura promedio de este, todas las lecturas de las repeticiones de cada tramo cumplen con la norma ASTM E-965 ya que esta establece que si una repetición del tramo en evaluación da como resultado una diferencia de su Macrotextura de 0.13 mm con respecto a la Macrotextura promedio del tramo evaluado, esta se desecha y debe realizarse otra repetición.

Tomando como parámetro los valores de amplitud o profundidad media de la Macrotextura establecidos por la PIARC (Asociación Mundial de Carreteras) en donde establece el rango de la amplitud o profundidad de la Macrotextura de 0.5mm a 20mm se puede decir que la Macrotextura superficial del pavimento de los tramos evaluados es aceptable.

REPETICIONES	MTD (mm)	PROMEDIO (mm)	DIFERENCIA (mm)	ASTM E-965 (diferencia \leq 0.13mm)
I	0.8225	0.8384	0.0158	cumple
II	0.8993	0.8384	0.0609	cumple
III	0.8259	0.8384	0.0124	cumple
IV	0.8057	0.8384	0.0326	cumple

Tabla 5.16 Comparación entre el valor de cada lectura y el valor promedio del MTD del tramo No 1, Fuente: Presentación de los autores.

REPETICIONES	MTD (mm)	PROMEDIO (mm)	DIFERENCIA (mm)	ASTM E-965 (diferencia \leq 0.13mm)
I	0.9356	0.9693	0.0337	cumple
II	0.9192	0.9693	0.0501	cumple
III	1.0462	0.9693	0.0768	cumple
IV	0.9763	0.9693	0.0006	cumple

Tabla 5.17 Comparación entre el valor de cada lectura y el valor promedio del MTD del tramo No 2, Fuente: Presentación de los autores.

REPETICIONES	MTD (mm)	PROMEDIO (mm)	DIFERENCIA (mm)	ASTM E-965 (diferencia \leq 0.13mm)
I	0.8993	0.8747	0.0246	cumple
II	0.8801	0.8747	0.0054	cumple
III	0.8670	0.8747	0.0076	cumple
IV	0.8524	0.8747	0.0223	cumple

Tabla 5.18 Comparación entre el valor de cada lectura y el valor promedio del MTD del tramo No 3, Fuente: Presentación de los autores.

5.3. ANÁLISIS ENTRE LA MACROTEXTURA DEL PROCESO DE LABORATORIO Y LA OBTENIDA EN CAMPO

Al realizar la comparación de la Macrotextura de la mezcla densa de 3/4 producida en el laboratorio de DISA A.S. de C.V. utilizando el método de Davis 2001 de la NCHRP 108 y la Macrotextura evaluada en el campo por medio del método volumétrico del círculo de arena normado en la ASTM E-965, se puede observar una diferencia entre sus resultados (ver tabla 5.4), esto no significa necesariamente que el método propuesto por la NCHRP₁₀₈ no funciona, si no más bien pueden influir factores como el tipo de agregado utilizado, tipos de mezcla,

las condiciones de diseño, etc. que se tomaron en cuenta para la determinación de la fórmula de evaluación de este método (Davis 2001, NCHRP-108), por lo que se propone para utilizar esta fórmula para evaluar la Macrotextura de las mezclas en el laboratorio, se realice una mayor investigación sobre la misma, aplicada a las condiciones y factores imperantes en nuestro país.

Tramo	Mezcla Asfáltica	MTD (mm)	Macrotextura Teórica (mm)
I-Calle principal San Gabriel sur	Densa ¾"	0.8384	2.33
II- Closter San Gabriel Sur	Densa ¾"	0.9693	2.33
III-Clúster San Gabriel Norte	Densa ¾"	0.8747	2.33

Tabla 5.19 Cuadro comparativo del MTD con la Macrotextura teórica, Fuente: Presentación de los autores.

ANÁLISIS DE LA MACROTEXTURA DEL PROYECTO

Para la evaluación de la Macrotextura de la mezcla aplicada como capa de rodadura en el proyecto Urbanístico Metrópolis San Gabriel se eligieron tres tramos al azar en diferentes etapas del proyecto, identificando cada uno de estos con el objetivo de verificar su Macrotextura, los resultado de los ensayos realizados se encuentra resumidos en la tabla 519, en la cual se puede identificar una diferencia leve entre cada una de la Macrotextura de los tramos ensayados, esta diferencia se encuentra dentro de las especificaciones establecidas en la norma ASTM E-965 (la diferencia entre los ensayos no debe ser mayo a 0 .13mm),por lo que se puede decir que los ensayos realizados cumplen.

Tramo	Mezcla Asfáltica	MTD (mm)
I-Calle principal San Gabriel sur	Densa 3/4	0.8384
II- Closter San Gabriel Sur	Densa 3/4	0.9693
III-Clúster San Gabriel Norte	Densa 3/4	0.8747

Tabla 5.20 Cuadro comparativo de la Macrotextura por tramos, Fuente: Presentación de los autores.

Las causas por las cuales se da esta diferencia a pesar de ser el mismo diseño de mezcla que se ha aplicado en proyecto pueden ser varias, por ejemplo:

Que en el proceso de producción se den pequeñas fallas como el mal ajuste de la planta producción, en cuanto a la calibración de los pesos para cada agregado que componen la mezcla cambiando de esta manera mínimamente la granulometría de la combinación de los agregados de la mezcla y por lo consiguiente de su Macrotextura.

Otra causa puede ser que en el proceso de colocación de la mezcla en sitio debido a que en este proceso se pueden dar errores como la colocación de mezclas asfálticas en caliente fuera de la temperatura de colocación, que para el caso de la mezcla densa diseñada para este proyecto el rango es entre 142 °C y 148°C, la cual depende del tipo de asfalto con el que se diseñó (AC-30), otro factor que cambia la Macrotextura del pavimento son los rastrilleros que van detrás de la pavimentadora tirando mezcla más fina en el centro del carril o en donde ven que queda más áspera la superficie cambiando así la Macrotextura (ver figura 5.1)



Figura 5.2 Proceso de colocación de carpeta asfáltica

Fuente: <http://www.elsalvador.com>

La evaluación de la Macrotextura en los pavimentos flexibles construidos con mezclas asfálticas densas en el país es un trabajo bastante arduo, debido a que pueden diseñarse un sin número de mezclas densas con diferentes granulometrías y tamaños máximos nominales, dando como resultado diferentes valores de Macrotextura, debido a que las únicas especificaciones son las del método de diseño y las especificaciones de la SIECA y no existe todavía en el país un reglamento o normas que especifique el tipo de Macrotextura de la superficie de los pavimentos tomando en cuenta los factores como la velocidad de circulación, tipo de camino, condiciones climáticas, etc.

Por lo que esta investigación solo es un pequeño aporte para futuras investigaciones que futuros profesionales decidan tomar para avanzar aun desarrollo verdadero en el sistema de carreteras en el país.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO VI

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Luego de haber realizado el estudio investigativo sobre la evaluación de la Macrotextura en pavimentos flexibles, construidos con mezclas asfálticas densas, diseñadas por el Método Marshall, se pueden considerar las siguientes conclusiones:

- El método más utilizado para el diseño de mezclas asfálticas en caliente es el Método Marshall debido a su bajo costo bajo y a su facilidad para transportarlo o portarlo, este método juntamente con el método HVEEN se fundamentan en la lógica de prueba y error donde se supone que las propiedades de la mezcla asfáltica están en función de sus características, en términos concretos el Método Marshall es un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica por medio del análisis de las relaciones estabilidad/fluencia y densidad/vacíos. Por lo que estos análisis son muy importantes debido a que garantizan que las proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de los rangos adecuados para asegurar una mezcla asfáltica durable.

- Con los resultados obtenidos al ensayar las briquetas elaboradas de cada punto de diseño y su posterior análisis según lo establecido en la metodología del diseño Marshall, se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico que satisface todos los requerimientos de las especificaciones utilizadas, el cual fue de 5.1% del peso de la mezcla.

- Las mezclas que más se producen en El Salvador para la construcción de pavimentos flexibles son las mezclas densas, pero el valor de su Macrotextura depende principalmente de los procesos de diseño, producción y colocación de la mezcla.
- La Macrotextura en El Salvador es un parámetro no exigible para la habilitación de las carreteras como lo es el IRI, a pesar que la norma ASTM E-965 establece esta, como de mucha importancia para velocidades de circulación mayores a 60 km/h, por lo que la investigación es un aporte que servirá como insumo a futuras investigaciones que se realicen sobre la Macrotextura en los pavimentos flexibles en El Salvador.
- La Macrotextura es una característica superficial de los pavimentos flexibles, y muy importante no solo porque según estudios citados en esta investigación, esta, determina la calidad que presta una carretera en cuanto a la seguridad y confort de los usuarios que circulan por ella, sino también porque define el tipo de mezcla a diseñar, es decir dependiendo de la Macrotextura requerida para un proyecto en específico así será el tipo de mezcla a diseñar.

RECOMENDACIONES

- Los valores de Macrotextura determinados representa únicamente la Macrotextura de la mezcla asfáltica densa diseñada para esta investigación, de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ de pulg. con las combinaciones, tamaño, tipos y procedencia de los agregados que satisfacen las especificaciones de la banda "C" de la SIECA, por lo que no debe de tomarse como un parámetro debido a que pueden realizarse un gran número de combinaciones para un diseño, atendiendo las bandas granulométricas de especificaciones de la SIECA, teniendo como resultado un rango de Macrotextura bastante amplio.
- Para estudio futuros se recomienda realizar investigaciones sobre el rango de Macrotextura de los pavimentos en El Salvador, teniendo en cuenta las velocidades de circulación permitidos, también verificar como afecta la disminución de los valores de la Macrotextura con el tiempo al pavimento y a la comodidad de circulación.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

Crespín, R. Santa Cruz, I. y Torres, P.(2012). "Aplicación del método Marshall y granulometría SUPERPAVE en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con asfalto clasificación grado de desempeño". Trabajo de graduación, Escuela de Ingeniería Civil, UES Septiembre 2012.

CRESPO, R. (1999). "Tipos de mezcla asfáltica de la superficie del pavimento. Jornadas sobre la calidad en el proyecto y la construcción de carreteras". Recuperado 10 de Mayo de 2014 (<http://www.aepo.es/ausc/publ/calidad.pdf>).

Guevara, M. Méndez, H. y Pimentel, J. (2010), "Diseño de mezclas asfálticas densas en frio basado en el Método Marshall modificado de la Universidad de Illinois", Departamento de Ingeniería y Arquitectura, UES septiembre 2010.

Hernández, D. (2009). Red vial en El Salvador. [versión electrónica]. Recuperado 28 de abril de 2014. (<http://www.mop.gob.sv>).

Hall, J. Smith, K & Titus, L. (2009). Determining Design Friction Level Guide for Pavement Friction. Vol. (108). pp. 108-120.

Linares, L. Morán, R. Peñate, R. (2010). Tipos de pavimentos. "Diseño de mezclas asfálticas drenantes en El Salvador". Departamento de Ingeniería y Arquitectura, UES Septiembre 2010.

López, D y Garnica, P. (2002). Medición de la textura por medio de la prueba del círculo de arena. Consideraciones para la aplicación del índice fricción internacional en carreteras de México. volumen (170), pp. 17-53.

87) Experimento Internacional AIPRC de Comparación y Armonización de las Medidas de Textura y Resistencia al Deslizamiento. COMITÉ TÉCNICO C.1. FRANCIA. 1996.

PG-3 (2002). Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso de la orden circular. Artículo 542; Madrid.

Roco, V. Fuentes, C. y Valverde, S. (2003). Evaluación de la resistencia al deslizamiento en pavimentos chilenos. [versión electrónica]. Recuperado 04 de Mayo de 2014

(http://www.udec.cl/~provincial/trabajos_pdf/33VictorRocoResistenciaDeslizamiento.pdf).

REFERENCIAS CONSULTADAS

- Alvarenga, E. (2003). Incidencia de los ciclos de calentamiento- enfriamiento en las propiedades del cemento asfáltico AC-30 utilizado en la producción de mezclas asfálticas en caliente. San Salvador.
- Escobar, M. y Alvarenga, E. (2011). Selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en caliente en El Salvador. San Salvador.
- Rodríguez, J. (2001). Incidencia de los Agregados en el Comportamiento de las Carpetas Asfálticas. Ministerio de Obras Públicas, Transporte, y de Vivienda y Desarrollo Urbano. San Salvador.
- González, W. (2007). "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.

ANEXOS

ANEXO 1: ENSAYOS A LOS AGREGADOS A UTILIZAR EN EL DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA

En el diseño de una mezcla asfáltica en caliente intervienen dos materiales indispensables que son los agregados pétreos y el asfalto que para nuestro caso se usara asfalto normal o sea sin aditivos; los agregados por su parte son de una gran importancia ya que en una mezcla asfáltica constituyen entre el 90 y el 95 por ciento en peso, y entre el 75 y 85 por ciento en volumen; es de mencionar que la calidad de la mezcla asfáltica depende de la calidad de los materiales constituyentes y la capacidad de carga de la carpeta es proporcionada esencialmente por los agregados, de esto se deriva la importancia de una adecuada selección y manejo de los materiales pétreos que serán utilizados para elaborar una mezcla asfáltica, específicamente en lo que se refiere a una buena distribución granulométrica. Una pequeña variación en el porcentaje de un determinado tamaño de agregado ó en las propiedades de éste puede causar cambios significativos en las propiedades de la mezcla elaborada por lo tanto es necesario llevar un control eficiente de los agregados que se está usando.

Para este diseño de mezcla asfáltica en caliente con un TMN de $\frac{3}{4}$ " se realizaron una serie de ensayos a los agregados a utilizar por parte de la empres DISA S.A. de C.V. los cuales fueron facilitados para su presentación en esta investigación.

ANEXO 1.1: ANALISIS POR TAMIZADO DE AGREGADOS GRUESO

ASTM C-136

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA GRAVA ¾"

PROYECTO:		Trabajo de Grado UES FMOcc					
SOLICITANTE:		Planta Asfáltica Constructora DISA					
PROCEDENCIA:		La Cantera, San Diego, La Libertad					
DESCRIPCIÓN:		Color Gris Oscuro con T.M.N.= ¾"					
Peso Inicial =		5,365.90 g		Tamaño Nominal=¾"		Máximo	
MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	ESPECIFICACIÓN	
NOMBRE	MM					Mínimo	Máximo
1 1/2"	37.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
1"	25.40	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
¾"	19.00	49.40 g	0.92 %	0.9 %	99.1 %		
½"	12.50	4,215.90 g	78.6 %	79.5 %	20.5 %		
3/8"	9.50	800.80 g	14.9 %	94.4 %	5.6 %		
No. 4	4.75	214.90 g	4.0 %	98.4 %	1.6 %		
No. 8	2.36	31.40 g	0.6 %	99.0 %	1.0 %		
No. 16	1.18	15.60 g	0.3 %	99.3 %	0.7 %		
No. 30	0.60	7.80 g	0.1 %	99.4 %	0.6 %		
No. 50	0.30	5.60 g	0.1 %	99.5 %	0.5 %		
No. 100	0.15	6.10 g	0.1 %	99.7 %	0.3 %		
No. 200	0.075	6.50 g	0.1 %	99.8 %	0.2 %		
FONDO		11.90 g	0.2 %	100 %	0.00 %		
TOTALES		5,365.90 g	100.00 %				
GRAVA= 98.42 %		ARENA= 1.36 %		FINOS = 0.22 %		SUMA= 100.00 %	

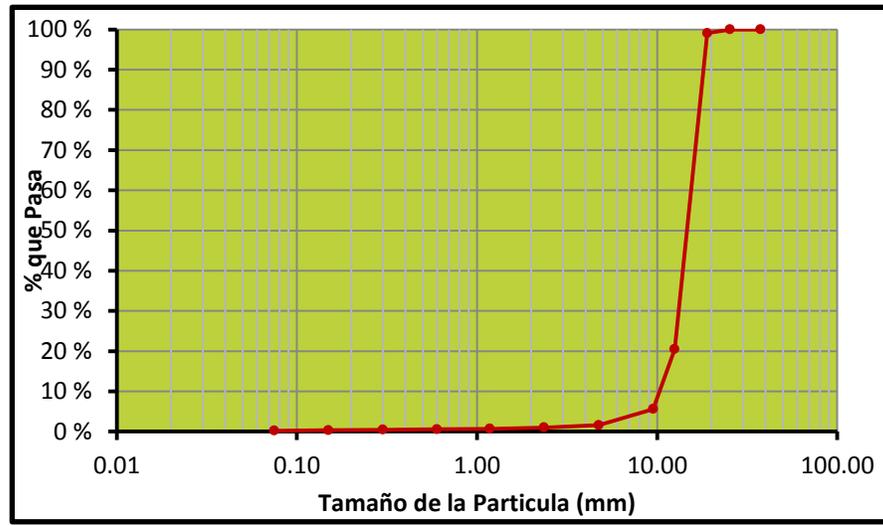


Grafico de Granulometría del agregado de 3/4"

ANEXO 1.2: ANALISIS POR TAMIZADO DE AGREGADOS GRUESO

ASTM C136

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA GRAVA ½"

PROYECTO:		Trabajo de Grado UES FMOcc					
SOLICITANTE:		Planta Asfáltica Constructora DISA					
PROCEDENCIA:		La Cantera, San Diego, La Libertad					
DESCRIPCIÓN:		Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N.= 1/2"					
Peso Inicial =		1,685.20 g		Tamaño Máximo Nominal =		½"	
MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	ESPECIFICACIÓN	
NOMBRE	MM					Mínimo	Máximo
1 1/2"	37.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
1"	25.40	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
3/4"	19.00	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
1/2"	12.50	131.20 g	7.79 %	7.79 %	92.21 %		
3/8"	9.50	482.50 g	28.63 %	36.42 %	63.58 %		
No. 4	4.75	908.90 g	53.93 %	90.35 %	9.65 %		
No. 8	2.36	103.10 g	6.12 %	96.47 %	3.53 %		
No. 30	0.60	33.10 g	1.96 %	98.43 %	1.57 %		
No. 50	0.30	6.40 g	0.38 %	98.81 %	1.19 %		
No. 200	0.075	10.10 g	0.60 %	99.41 %	0.59 %		
FONDO		9.90 g	0.59 %	100.00 %	0.00 %		
TOTALES		1,685.20 g	100.00 %				
GRAVA=		ARENA=		FINOS=		SUMA=	
90.35 %		9.06 %		0.59 %		100.00 %	

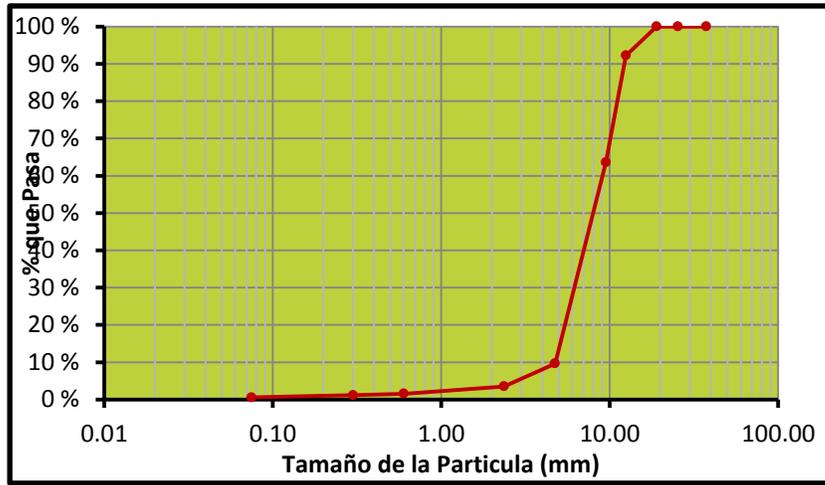


Gráfico de Granulometría del agregado de 1/2"

ANEXO 1.3: ANALISIS POR TAMIZADO DE AGREGADOS FINO

ASTM C136

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO

PROYECTO:		Trabajo de Grado UES FMOcc					
SOLICITANTE:		Planta Asfáltica Constructora DISA					
PROCEDENCIA:		La Cantera, San Diego, La Libertad					
DESCRIPCIÓN:		Arena Mal Graduada, Color Gris Oscuro					
Peso Inicial=568.10 g							
MALLA		Peso Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje que Pasa	ESPECIFICACION	
NOMBRE	MM					Mínimo	Máximo
1 1/2"	37.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
1"	25.40	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
3/4"	19.00	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
1/2"	12.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
3/8"	9.50	0.00 g	0.00 %	0.00 %	100.00 %		
No. 4	4.75	25.20 g	4.44 %	4.44 %	95.56 %		
No. 8	2.36	126.00 g	22.18 %	26.62 %	73.38 %		
No. 16	1.18	120.00 g	21.12 %	47.74 %	52.26 %		
No. 30	0.60	91.10 g	16.04 %	63.77 %	36.23 %		
No. 50	0.30	70.40 g	12.39 %	76.17 %	23.83 %		
No. 100	0.15	50.40 g	8.87 %	85.04 %	14.96 %		
No. 200	0.075	34.40 g	6.06 %	91.09 %	8.91 %		
FONDO		50.60 g	8.91 %	100.00 %	0.00 %		
TOTALES		568.10 g	100.00 %				
GRAVA=	4.44 %	ARENA=	86.66 %	FINOS=	8.91 %	SUMA=	100.00 %

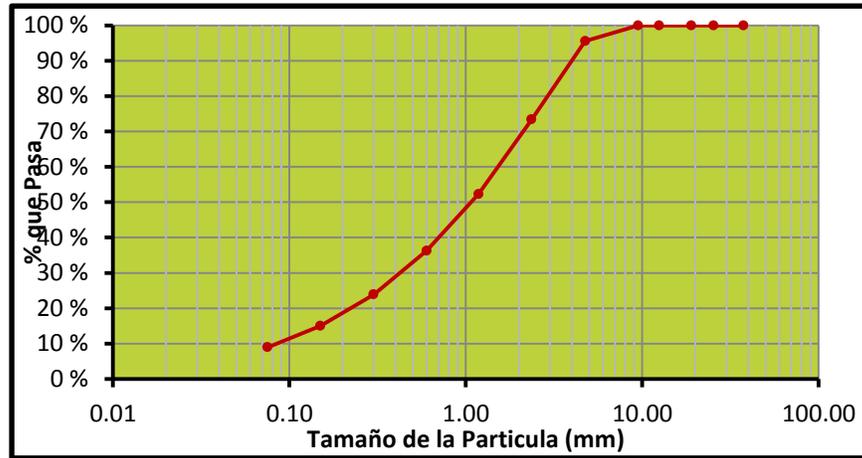


Gráfico de Granulometría de agregado fino

ANEXO 1.4: ENSAYO DEL EQUIVALENTE DE ARENA

ASTM D 2419

				
PROYECTO: Trabajo de Grado UES FMOcc				
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA			
PROCEDENCIA:	La Cantera, San Diego, La Libertad			
DESCRIPCIÓN:	ARENA MAL GRADUADA, COLOR GRIS OSCURO			
MUESTRA N°	ALTURA DEL SEDIMENTO (h)	ALTURA DE ARENA DESPUES DE INTRODUCIR EN PISTON (H)	EQUIVALENTE DE ARENA	
1	2.9	4.7	61.70%	
2	2.9	4.7	61.70%	
		PROMEDIO	61.70%	
OBSERVACIONES:				

**ANEXO 1.5: ENSAYO DE PARTÍCULAS DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS AGREGADO DE 3/4" ASTM
D 4791**

PROYECTO:		Trabajo de Grado UES FMOcc							
SOLICITANTE:		Planta Asfáltica Constructora DISA							
PROCEDENCIA:		Cantera Hacienda Las Palmeras DISA							
DESCRIPCIÓN:		Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N.= 3/4"							
		RELACION 1-3							
Peso Inicial=		5,365.90 g			Tamaño Máximo Nominal =		3/4"		
MALLA		% Retenido Parcial Retenido	Cantidad de Muestra Ensayada	Fracción de Partículas Planas	% Partículas Planas	Fracción de Partículas Alargadas	% Partículas Alargadas	Fracción de Partículas Planas y Alargadas	% de Partículas Planas y Alargadas
NOMBRE	MM								
1 1/2"	37.50								
1"	25.40								
3/4"	19.00	0.90 %							
1/2"	12.50	78.60 %	929.80	40.30	3.41	0.00	0.00	0.00	0.00
3/8"	9.50	14.90 %	228.20	33.20	2.17	0.00	0.00	0.00	0.00
No. 4	4.75	4.00 %							
No. 8	2.36	0.60 %							
No. 30	0.60	0.40 %							
No. 50	0.30	0.10 %							
No. 200	0.075	0.20 %							
FONDO		0.20 %							
				74	5.57 %	0	0.00 %	0	0.00 %
GRAVA=	96.00 %	ARENA=	3.80 %	FINOS=	0.20 %	SUMA=			100.00 %

RESUMEN	
Peso original de la muestra total a ensayarse	
% Partículas planas	5.57 %
% Partículas Alargadas	0.00 %
% Partículas planas y alargadas	0.00 %
% Partículas NO planas NI alargadas	94.43 %

**ANEXO 1.6: ENSAYO DE PARTÍCULAS DE PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS AGREGADO DE 1/2" ASTM
D 4791**

PROYECTO:	Trabajo de Grado UES FMOcc								
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA								
PROCEDENCIA:	Cantera Hacienda Las Palmeras DISA								
DESCRIPCIÓN:	Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N.= 1/2"								
RELACION 1-3									
Peso Inicial=		1,685.00 g		Tamaño Máximo Nominal =		1/2"			
MALLA		% Retenido Parcial	Cantidad de Muestra Ensayada	Fracción de Partículas Planas	% Partículas Planas	Fracción de Partículas Alargadas	% Partículas Alargadas	Fracción de Partículas Planas y Alargadas	% de Partículas Planas y Alargadas
NOMBRE	MM								
1 1/2"	37.50								
1"	25.40								
3/4"	19.00	0.00 %							
1/2"	12.50	7.79 %	131.30	3.60	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00
3/8"	9.50	28.63 %	312.50	17.60	1.61	0.00	0.00	0.00	0.00
No. 4	4.75	53.93 %							
No. 8	2.36	6.12 %							
No. 30	0.60	1.96 %							
No. 50	0.30	0.38 %							
No. 200	0.075	0.60 %							
FONDO		0.59 %							
				18	1.83 %	0	0.00 %	0	0.00 %
GRAVA=	46.07 %	ARENA=	53.33 %	FINOS=	0.60 %	SUMA=			100.00 %

RESUMEN	
Peso original de la muestra total a ensayarse	
% Partículas planas	1.83 %
% Partículas Alargadas	0.00 %
% Partículas planas y alargadas	0.00 %
% Partículas NO planas NI alargadas	98.17 %

**ANEXO 1.8: DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO Y DE ABSORCION
DEL AGREGADO GRUESO ASTM C 127**

DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO Y DE ABSORCION GRAVA ¾"

PROYECTO: Trabajo de Grado UES FMOcc			
SOLICITANTE: Planta Asfáltica Constructora DISA			
PROCEDENCIA: Cantera "Hacienda las Palmeras" DISA			
DESCRIPCIÓN: Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N.= ¾"			
Muestra No.		1	2
Peso Muestra Seca (g)	A	2,214.00 g	2,211.50 g
Peso de Material S.S.S. (g)	B	2,258.40 g	2,256.30 g
Peso del Material Sumergido (g)	C	1,400.30 g	1,401.00 g
Peso Específico Seco	A / (B - C)	2.580	2.586
Peso Específico Seco Promedio		2.583	
Peso Específico S.S.S.	B / (B - C)	2.632	2.638
Peso Específico S.S.S. Promedio		2.635	
Peso Específico Aparente	A / (A - C)	2.721	2.729
Peso Específico Aparente Promedio		2.725	
Porcentaje de Absorción	(B - A) / A	2.01 %	2.03 %
Porcentaje de Absorción Promedio		2.02 %	

**ANEXO 1.9: DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO Y DE ABSORCION
DEL AGREGADO GRUESO ASTM C 127**

DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO Y DE ABSORCION GRAVA 1/2"

PROYECTO:	Trabajo de Grado UES FMOcc			
SOLICITANTE:	Planta Asfáltica Constructora DISA			
PROCEDENCIA:	La Cantera, San Diego, La Libertad			
DESCRIPCIÓN:	Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N.= 1/2"			
				
Muestra No.		1	2	
Peso Muestra Seca (g)	A	2,342.90 g	2,341.60 g	
Peso de Material S.S.S. (g)	B	2,388.00 g	2,387.00 g	
Peso del Material Sumergido (g)	C	1,487.00 g	1,486.00 g	
Peso Específico Seco	A / (B - C)	2.600	2.599	
Peso Específico Seco Promedio		2.600		
Peso Específico S.S.S.	B / (B - C)	2.650	2.649	
Peso Específico S.S.S. Promedio		2.650		
Peso Específico Aparente	A / (A - C)	2.737	2.737	
Peso Específico Aparente Promedio		2.737		
Porcentaje de Absorción	(B - A) / A	1.925 %	1.939 %	
Porcentaje de Absorción Promedio		1.93 %		

**ANEXO 1.10: DETERMINACION DEL PESO ESPECIFICO Y DE ABSORCION
AGREGADO FINO ASTM C 128**

PROYECTO	Trabajo de Grado UES FMOcc				
SOLICITANTE	Planta Asfáltica Constructora DISA				
PROCEDENCIA	La Cantera, San Diego, La Libertad				
DESCRIPCIÓN	Arena Mal Graduada, Color Gris Oscuro				
Muestra No.		1	2	3	
Peso de Material S.S.S. (g)	W	401.00 g	401.00 g	401.00 g	
Peso Seco (g)	A	901.20 g	901.00 g	901.10 g	
Peso de Picnómetro + Agua (g)	B	1,455.70 g	1,454.60 g	1,454.70 g	
Peso de Picnómetro + Agua + Material (g)	C	1,758.10 g	1,758.60 g	1,758.60 g	
Peso Específico S.S.S.	W / (B + W - C)	4.067	4.134	4.130	
Peso Específico SSS Promedio		4.110			
Peso Específico Seco	A / (B + W - C)	9.140	9.289	9.280	
Peso Específico Seco Promedio		9.236			
Peso Específico Aparente	A / (B + A - C)	1.505	1.509	1.509	
Peso Específico Aparente Promedio		1.508			
Porcentaje de Absorción	(W - A) / A	-55.50 %	-55.49 %	-55.50 %	
Porcentaje de Absorción Promedio		-55.50%			

ANEXO 1.11: ENSAYO DE PARTICULAS DE CARAS FRACTURADAS GRAVA
¾ " ASTM D-5821

PROYECTO:		Trabajo de Grado UES FMOcc							
SOLICITANTE:		Planta Asfáltica Constructora DISA							
PROCEDENCIA:		La Cantera, San Diego, La Libertad							
DESCRIPCIÓN:		Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N.= ¾"							
Peso neto inicial =			5365.9		Tamaño máximo nominal = ¾"				
Malla		Peso retenido según granulometría	Cantidad de partículas retenidas	Cantidad de partículas fracturadas por fracción	Cantidad de partículas no fracturadas por fracción	% Partículas fracturadas en la fracción (P)	Dudosa	Cantidad de partículas fracturas en muestra total (FT)	
Tamaño del agregado									
1"	¾"	0.00	-						
¾"	½"	4265.30	1,210.00	1207.20	2.80	99.77	-	4255.43	
½"	⅜"	800.80	310.00	310.00	0.00	100.0	-	800.80	
⅜"	No. 4						-		
No. 4	No. 8								
Fondo									
Totales		5,066.1	1,520.0	1,517.2	2.80			5,056.23	
Consideraciones de Ensayo									
1	Porcentaje de Partículas Con Caras Fracturadas PFT =						94.2 %		
2	Porcentaje de Partículas Con Caras No Fracturadas =						5.8 %		
3	Porcentaje de Partículas Con Caras Dudosas =						0.0 %		
4	Criterio Para el Ensayo: Dos o Más Caras Fracturadas								

$$P = 100 * (F/(F+N))$$

$$PFT = 100 * FT / MT$$

**ANEXO 1.12: ENSAYO DE PARTICULAS DE CARAS FRACTURADAS GRAVA
½ " ASTM D-5821**

PROYECTO:		Trabajo de Grado UES FMOcc							
SOLICITANTE:		Planta Asfáltica Constructora DISA							
PROCEDENCIA:		La Cantera, San Diego, La Libertad							
DESCRIPCIÓN:		Grava Mal Graduada, Color Gris Oscuro con T.M.N.= 1/2"							
Peso neto inicial =		1685.2		Tamaño máximo nominal = 1/2"					
Malla		Peso retenido según granulometría	Cantidad de partículas retenidas	Cantidad de partículas fracturadas por fracción	Cantidad de partículas no fracturadas por fracción	% Partículas fracturadas en la fracción (P)	Dudosa	Cantidad de partículas fracturas en muestra total (FT)	
Tamaño del agregado									
1"	3/4"	0.00	-	0.00					
3/4"	1/2"	131.20	131.20	131.20	0.00	100.00	-	131.20	
1/2"	3/8"	482.50	310.00	310.00	0.00	100.0	-	482.50	
3/8"	No. 4	908.10	908.10	908.10	0.00	100.0	-	908.10	
No. 4	No. 8	103.00	103.00	103.00	0.00	100.0		103.00	
Fondo		0.00	0.00	0.00					
Totales		1,624.8	1,452.3	1,452.3	0.00			1,624.80	
Consideraciones de Ensayo									
1 -	Porcentaje de Partículas Con Caras Fracturadas PFT =						96.4 %		
2 -	Porcentaje de Partículas Con Caras No Fracturadas =						3.6 %		
3 -	Porcentaje de Partículas Con Caras Dudosas =						0.0 %		
4 -	Criterio Para el Ensayo: Dos o Más Caras Fracturadas								
		$P = 100 * \frac{F}{(F+N)}$ $PFT = 100 * \frac{FT}{MT}$							

ANEXO 2: RAZÓN DE CORRELACIÓN ESTABILIDAD

Volumen de Espécimen, Cm ³	Espesor Aproximado de Espécimen, pulg.	mm	Razón de correlación
200 a 213	1	25.4	5.56
214 a 225	1 1/16	27.0	5.00
226 a 237	1 1/8	28.6	4.55
238 a 250	1 3/16	30.2	4.17
251 a 264	1 ¼	31.8	3.85
265 a 276	1 5/16	33.3	3.57
277 a 289	1 3/8	34.9	3.33
290 a 301	1 7/16	36.5	3.03
302 a 316	1 ½	38.1	2.78
317 a 328	1 9/16	39.7	2.50
329 a 340	1 5/8	41.3	2.27
341 a 353	1 11/16	42.9	2.08
354 a 367	1 ¾	44.4	1.92
368 a 379	1 13/16	46.0	1.79
380 a 392	1 7/8	47.6	1.67
393 a 405	1 15/16	49.2	1.56
406 a 420	2	50.8	1.47
421 a 431	2 1/16	52.4	1.39
432 a 443	2 1/8	54.0	1.32
444 a 456	2 3/16	55.6	1.25
457 a 470	2 ¼	57.2	1.19
471 a 482	2 5/16	58.7	1.14
483 a 495	2 3/8	60.3	1.09
496 a 508	2 7/16	61.9	1.04
509 a 522	2 ½	63.5	1.00
523 a 535	2 9/16	65.1	0.96
536 a 546	2 5/8	66.7	0.93
547 a 559	2 11/16	68.3	0.89
560 a 573	2 ¾	69.9	0.86
574 a 585	2 13/16	71.4	0.83
586 a 598	2 7/8	73.0	0.81
599 a 610	2 15/16	74.6	0.78
611 a 625	3	76.2	0.76