

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



TRABAJO DE GRADUACION:

**“SUSCEPTIBILIDAD TERMICA DE LOS PAVIMENTOS
ASFALTICOS UTILIZADOS EN EL SALVADOR”.**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL.

PRESENTADO POR:

ALBEÑO CÁCERES, HUGO ALONSO.

MOLINA UMAÑA, VERÓNICA DEL CARMEN.

REYNOZA MORAN, SALVADOR EDMUNDO.

DOCENTE DIRECTOR

ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMÚDEZ.

DICIEMBRE 2012

SANTA ANA

EL SALVADOR

CENTROAMÉRICA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

VICE-RECTOR ACADÉMICO:

MAESTRA ANA MARÍA GLOWER DE ALVARADO

VICE-RECTOR ADMINISTRATIVO:

LIC. SALVADOR CASTILLO AREVALO.

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FISCAL GENERAL:

LIC. FRANCISCO CRUZ LETONA

DICIEMBRE 2012

SANTA ANA

EL SALVADOR

CENTROAMERICA

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE

DECANO:

LIC. RAÚL ERNESTO AZCÚNAGA LÓPEZ.

VICE-DECANO:

ING WILLIAM VIRGILIO ZAMORA GIRON.

SECRETARIO DE LA FACULTAD:

LICDO. VÍCTOR HUGO MERINO QUEZADA

JEFE DE DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA:

ING Y MASTER SORAYA LISSETTE BARRERA DE GARCIA.

DICIEMBRE 2012

SANTA ANA

EL SALVADOR

CENTROAMERICA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director:

ING. RAÚL ERNESTO MARTÍNEZ BERMÚDEZ.

DICIEMBRE 2012

SANTA ANA

EL SALVADOR

CENTROAMERICA

AGRADECIMIENTOS.

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

Agradezco a ASFALCA, por la paciencia y por la dirección de este trabajo.

Gracias también a mis queridos compañeros, que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante todo este tiempo de la realización de la tesis, viviendo aventuras, problemas, alegrías, tristezas, gracias Chamba y Hugo, se les quiere.

Gracias de una manera general a todos mis amigos(as) y familiares que confiaron en mí y siempre me apoyaron.

A mi madre Flor de María Umaña de Molina y a mi hermano Frank Alexander Molina que me acompañaron en esta aventura que significó mucho para ellos como para mí, que a pesar de sus preocupaciones me dieron la posibilidad de brillar y de forma incondicional, entendieron mis ausencias y mis malos momentos. A mi padre, que a pesar de la distancia siempre estuvo atento para saber cómo iba mi proceso.

A mi abuelita Carmen que siempre ha sido un ejemplo y un estímulo para vivir, y sacarle el jugo a la vida.

Mi logro se lo dedico principalmente al ser más especial de mi vida, mi hijo Carlitos, porque a pesar que nació en el tiempo de mi carrera siempre ha sido el motor para llegar a culminar este sueño, Te amo hijo. Dedicado también a mi abuelita Rosa que en paz descansa, sé que estés donde estés vives mi alegría. Te quiero abuelita. Gracias a todas y cada una de las personas que participaron en la investigación realizada ya que invirtieron su tiempo y conocimiento para ayudarme para completar mi proyecto de tesis.

Gracias a todos.

AGRADECIMIENTOS.

A DIOS. Por brindarme la oportunidad de culminar mis estudios a pesar de tantos obstáculos presentados y por poner a mi lado a las persona ideales para ayudarme en mi vida.

A MI MADRE. Isolina Cáceres, no puedo pensar en otra persona más importante en mi vida en todos los aspectos, sin su aliento y ayuda nada de esto sería posible, siempre le estaré agradecido.

A CLARA MENDOZA. La luz de mi vida. Sin duda la mujer con más talento que he conocido en mi vida y la culpable que haya escogido esta carrera que tanto me apasiona. Le agradezco por darme su amor, compañía y consejos invaluables en todo momento, mi inspiración y la razón de todo lo que hago.

A MIS HERMANOS. José, Madeli, Ronald, Marlene, Melina, Ernesto, Gabriela y Karla. Todos y cada uno de ellos me ayudaron de una u otra forma a conseguir este logro tan importante, les debo mucho a todos.

A MIS DOCENTES. Gracias por compartir sus conocimientos conmigo a lo largo de estos años. Algunos de ellos los considero mis amigos y modelos a seguir, muchas gracias.

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS. Salvador y Verónica. Gracias por confiar en mí para dar el último paso de nuestra carrera.

AL PERSONAL DE ASFALCA. Por su ayuda desinteresada en brindarnos todo lo necesario para desarrollar el presente trabajo de grado.

A TODOS LOS INVOLUCRADOS EN MI ETAPA COMO ESTUDIANTE. Son tantas personas las que han influido en mi vida que es difícil incluirlos a todos, mis más sinceros agradecimientos.

HUGO ALONSO ALBEÑO CACERES

INDICE.

INTRODUCCION.....	XIX
CAPITULO I. GENERALIDADES.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	8
1.4 ALCANCES GLOBALES.....	9
1.5 LIMITACIONES.....	11
1.6 JUSTIFICACION.....	12
CAPITULO II. BASE TEORICA.....	13
2.1 CONDICIONES CLIMATICAS EN EL SALVADOR.....	14
2.1.1 ESTACIONES METEREOLÓGICAS DE EL SALVADOR.....	14
2.1.2 DETERMINACION DE LA TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL EN EL SALVADOR.....	16
2.1.3 CARACTERIZACION CLIMATICA DEL TERRITORIO DE EL SALVADOR.....	17
2.2 CONCEPTOS BASICOS SOBRE PAVIMENTOS.....	18
2.2.1 DEFINICION DE PAVIMENTO.....	18
2.2.2 CARACTERISTICAS QUE DEBE REUNIR UN PAVIMENTO.....	18
2.2.3 TIPOS DE PAVIMENTO.....	19
2.2.3.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	19
2.2.3.2 PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS.....	20
2.2.3.3 PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	21
2.2.3.4 PAVIMENTOS ARTICULADOS.....	22
2.3 GENERALIDADES DEL ASFALTO.....	22
2.3.1 HISTORIA DEL ASFALTO.....	22
2.3.2 ¿QUÉ ES UN ASFALTO?.....	23
2.3.3 COMPOSICIÓN DEL ASFALTO.....	25
2.3.4 OBTENCIÓN DEL ASFALTO EN REFINERÍAS.....	26

2.3.4.1 DESTILACIÓN PRIMARIA.....	26
2.3.4.2 DESTILACIÓN AL VACÍO.....	26
2.3.4.3 DESASFALTIZACIÓN CON PROPANO O BUTANO.....	27
2.3.5 CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO.....	27
2.3.6 PROCESOS DEL ASFALTO.....	28
2.3.7 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ASFALTOS.....	29
2.3.7.1 DENSIDAD.....	29
2.3.7.2 PENETRACIÓN.....	29
2.3.7.3 VISCOSIDAD.....	30
2.3.7.4 PUNTO DE ABLANDAMIENTO.....	30
2.3.7.5 DUCTILIDAD.....	31
2.3.7.6 PUNTO DE INFLAMACIÓN.....	32
2.3.7.7 VOLATILIDAD.....	32
2.3.7.8 SOLUBILIDAD.....	33
2.3.7.9 ADHERENCIA.....	33
2.3.7.10 ENVEJECIMIENTO.....	33
2.3.7.11 COMPORTAMIENTO MECÁNICO.....	33
2.3.7.12 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO.....	34
2.3.8 PROPIEDADES QUIMICAS DE LOS ASFALTOS.....	35
2.4 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.....	37
2.4.1 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN POR PENETRACIÓN.....	38
2.4.2 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD.....	40
2.4.3 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO.....	43
2.5 DEFINICION DE MEZCLA ASFALTICA.....	45
2.5.1 COMPORTAMIENTO DEL LIGANTE ASFALTICO.....	45
2.5.2 COMPORTAMIENTO DEL AGREGADO MINERAL.....	46
2.5.3 COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	47
2.6 TIPOLOGIAS DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS.....	48
2.6.1 MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.....	48

2.6.1.1	EVOLUCIÓN DE LOS DISEÑOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.....	49
2.6.2	MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO.....	50
2.6.3	MEZCLA POROSA O DRENANTE.....	50
2.6.4	MICROAGLOMERADOS.....	51
2.6.5	MASILLAS.....	51
2.6.6	MEZCLAS DE ALTO MÓDULO.....	51
2.7	TIPOS DE DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS.....	52
2.7.1	FALLOS EN LA CONSTRUCCIÓN.....	52
2.7.2	EXUDACIONES.....	54
2.7.3	SEGREGACIONES.....	55
2.7.4	DESENVUELTA O DESPLAZAMIENTO DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.....	57
2.7.5	TEXTURA SUPERFICIAL INADECUADA.....	59
2.7.6	AGRIETAMIENTOS Y FISURAS.....	60
2.7.7	BOMBEO DE FINOS.....	61
2.7.8	DEFORMACIONES PLÁSTICAS.....	62
CAPITULO III.	ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS UTILIZADOS EN EL SALVADOR.....	65
3.1	REGISTRO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO ASFALTICO DE EL SALVADOR.....	66
3.1.1	DETERMINACION DE TEMPERATURA DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS DE EL SALVADOR.....	66
3.1.2	ANÁLISIS DE REGISTROS HISTORICOS DE TEMPERATURA DEL AIRE EN EL TERRITORIO DE EL SALVADOR.....	66
3.2	EVALUACION DIRECTA DE LA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO ASFALTICO EN LAS CARRETERAS DE EL SALVADOR.....	69
3.2.1	METODO SUPERPAVE.....	70
3.2.2	METODO DE CAMPO.....	71
3.2.2.1	DESARROLLO DEL METODO DE CAMPO.....	72
3.2.3	PRESENTACION DE RESULTADOS DE LA EVALUACION.....	78

3.2.4	ANALISIS DE LOS RESULTADOS PRODUCTO DE LA EVALUACION DIRECTA DE LA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO ASFALTICO EN LAS CARRETERAS DE EL SALVADOR.....	80
3.3	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS LIGANTES ASFALTICOS.	82
3.3.1	COHESIÓN.....	82
3.3.2	SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA.	83
3.3.3	ADHESIVIDAD ÁRIDO-LIGANTE.	83
3.3.4	ENVEJECIMIENTO.....	84
3.4	CARACTERISTICAS TERMICAS DE LOS MATERIALES PARA LA ELABORACION DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE.	85
3.4.1	AGREGADOS PETREOS.....	85
3.4.1.1	DEFINICIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS.....	85
3.4.1.2	TIPOS DE AGREGADOS PÉTREOS.....	85
3.4.1.3	PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.....	86
3.4.1.4	NATURALEZA PETROLÓGICA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.....	87
3.4.1.5	CONSIDERACIONES ACERCA DEL EMPLEO DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.....	88
3.4.2	LIGANTES ASFALTICOS.....	89
3.4.2.1	ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO ASTM D36	89
3.4.2.2	ENSAYO DE VISCOSIDAD ASTM D 2171	92
3.4.2.3	ENSAYO DE PENETRACION ASTM D5	95
3.4.2.4	PUNTO DE INFLAMACION ASTM D 92	96
3.5	DETERMINACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA.....	100
3.5.1	METODO UCL	100
3.5.1.1	DEFINICIÓN DEL METODO UCL.	100
3.5.1.2	DESCRIPCIÓN DEL METODO UCL.....	100
3.5.1.3	PROCEDIMIENTO DEL METODO UCL.....	101
3.5.1.4	CRITERIOS DE CLASIFICACION DEL METODO UCL.	102

3.5.2	PREPARACIÓN Y FABRICACIÓN DE BRIQUETAS MARSHALL PARA EL ENSAYO CÁNTABRO.....	103
3.5.2.1	DETERMINACION DE LA METODOLOGIA A UTILIZAR PARA LLEVAR A CABO LA FABRICACION DE BRIQUETAS.....	103
3.5.2.2	PREPARACION DE LA GRANULOMETRIA.....	105
3.5.2.3	ELABORACIÓN DE LA MEZCLA.....	107
3.5.2.4	ELABORACION DE LAS BRIQUETAS CILINDRICAS TIPO MARSHALL.....	109
3.5.2.5	PROCESO DE CURADO O ENVEJECIMIENTO DE BRIQUETAS.....	114
3.5.2.6	ENSAYO CANTABRO EN SECO PARA LA DETERMINACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA.....	116
3.5.3	PRESENTACION DE RESULTADOS DEL ENSAYO CANTABRO.	120
3.5.3.1	ANALISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO CANTABRO.....	122
3.6	METODOLOGIA PARA LA SELECCIÓN DE LIGANTES ASFALTICOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS.....	128
3.6.1	METODOLOGIA DE SELECCIÓN DE LIGANTES DE SUPERPAVE.....	129
3.6.2	Método del INSTITUTO DEL ASFALTO.....	133
3.6.3	METODOLOGIA DEL DEPARTAMENTO DE DEFENSA DE LOS ESTADOS UNIDOS.....	133
3.7	SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFALTICO PARA PRODUCIR MESCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE EN EL SALVADOR.....	135
3.8	GUÍA PARA LA SELECCION DEL CEMENTO ASFÁLTICO DE ACUERDO A LA ZONA DE EMPLAZAMIENTO DEL PROYECTO.....	138
	CAPITULO IV. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES.....	140
4.1	CONCLUSIONES.....	141
4.2	RECOMENDACIONES.....	144
	GLOSARIO.....	145
4.3	BIBLIOGRAFIA.....	153
	ANEXOS.....	155

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1	Concepto susceptibilidad térmica.....	4
Figura 2.1	Mapa del territorio nacional que muestra la temperatura promedio anual para un periodo de 15 años.....	16
Figura 2.2	Sección típica de un pavimento.....	18
Figura 2.3	Productos y Temperaturas típicas de destilación.....	25
Figura 2.4	Proceso de refinación del petróleo.....	27
Figura 2.5	Ensayo de penetración.....	39
Figura 2.6	Esquema de la determinación de la Viscosidad relativa.....	30
Figura 2.7	Esquema de Viscosímetro capilar.....	30
Figura 2.8	Diagrama de ensayo de punto de ablandamiento (anillo y bola).....	31
Figura 2.9	Diagrama del ensayo de ductilidad.....	32
Figura 2.10	Esquema de la copa Cleveland.....	32
Figura 2.11	Rigidez del ligante asfáltico y ángulo de fase.....	34
Figura 2.12	Propiedades del ligante asfáltico en función de la temperatura.....	35
Figura 2.13	Composición del asfalto.....	36
Figura 2.14	Estructura coloidal del asfalto.....	37
Figura 2.15	Resultados de ensayos de viscosidad a 60°C, realizados en asfaltos clasificados por penetración.....	39
Figura 2.16	Comparación de sistemas de clasificación por Penetración y Viscosidad.....	42

Figura 2.17	Comparación de sistemas de clasificación de asfaltos.....	42
Figura 2.18	Fallos en la Construcción de pavimentos asfálticos.....	54
Figura 2.19	Exudaciones en pavimentos asfálticos.....	54
Figura 2.20	Segregaciones en pavimentos asfálticos.....	57
Figura 2.21	Desenvuelta o Desplazamiento de los agregados en pavimentos asfálticos.....	58
Figura 2.22	Textura superficial inadecuada en pavimentos asfálticos.....	59
Figura 2.23	Agrietamientos y Fisuras en pavimentos asfálticos.....	61
Figura 2.24	Bombeo de finos en pavimentos asfálticos.....	62
Figura 2.25	Deformaciones plásticas permanentes en pavimentos asfálticos.....	64
Figura 3.1	Esquema de ubicación de Estaciones Meteorológicas utilizadas para la investigación.....	68
Figura 3.2	Mapa de El Salvador que muestra las zonas geográficas en la cual el territorio nacional se divide.....	69
Figura 3.3	Muestra un esquema de medición de temperatura del pavimento...	72
Figura 3.4.	Muestra el galón de aceite térmico y otras herramientas utilizadas para la toma de temperatura en campo.....	72
Figura 3.5.	Zona de medición carretera a Acajutla departamento de Sonsonate. Integrante del grupo de investigación iniciando la etapa de perforación de agujeros sobre la carretera.....	73
Figura 3.6	Zona de medición carretera a Cerro Verde departamento de Santa Ana. Integrantes del grupo de investigación vertiendo aceite térmico dentro de los agujeros previamente perforados.....	74

Figura 3.7	Zona de medición carretera de Metapán departamento de Santa Ana. Integrante del grupo de investigación tomando los datos de coordenadas geográficas del punto donde se tomara la temperatura del pavimento.....	75
Figura 3.8	Muestra la colocación del termómetro de espiga en el agujero y la forma en la cual se toman los datos de temperatura.....	76
Figura 3.9	Integrantes del grupo de investigación realizando anotaciones en bitácora.....	76
Figura 3.10	Anotaciones en bitácora de la temperatura a la cual se encuentra el pavimento asfáltico y de las condiciones climáticas adversas para el desarrollo de la investigación.....	77
Figura 3.11	Esquema de ubicación de estaciones meteorológicas y puntos de mediciones de temperatura en campo.....	82
Figura 3.12	Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes Bituminosos (CURVA DE ESTADO).....	83
Figura 3.13	Evaluación de la adhesividad árido-ligante. Pérdidas al cántabro en Seco y tras inmersión.....	84
Figura 3.14	Curva de envejecimiento, relaciona el tiempo de envejecimiento respecto a la perdida al cántabro.....	85
Figura 3.15	Equipo para la determinación del punto de ablandamiento (ASTM D36). La imagen muestra algunos de los instrumentos utilizados para la realización del ensayo.....	90
Figura 3.16	Equipo para la determinación del ensayo de viscosidad (ASTM D2170-01).....	93
Figura 3.17	Equipo para la determinación de la penetración en laboratorio (ASTM D5).....	95
Figura 3.18	Equipo para determinación de punto de inflamación según Cleveland copa abierta (ASTM D92).....	97

Figura 3.19	Curva granulométrica seleccionada.....	106
Figura 3.20	Tamizado de los agregados pétreos para conseguir la granulometría T-10.....	107
Figura 3.21	Muestra la bascula digital empleada para realizar el proceso de mesclado en el momento de pesado de una tara.....	109
Figura 3.22	Martillo mecánico normalizado, la figura de la izquierda muestra la maquina que hace funcionar al martillo que se muestra en la figura de la derecha.....	110
Figura 3.23	Conjunto de compactación.....	111
Figura 3.24	Maza de compactación para el aparato Marshall.....	112
Figura 3.25	Briquetas cilíndricas tipo Marshall en proceso de enfriado después de compactadas.....	113
Figura 3.26	Proceso de desmoldado de una briqueta.....	113
Figura 3.27	Briquetas fabricadas del tipo de asfalto AC-30 ya desmoldadas y etiquetadas.....	114
Figura 3.28	Dispositivo estabilizador de briquetas empleado para evitar el desmoronamiento y la pérdida de la forma cilíndrica producto de las altas temperaturas a las que se sometieron.....	115
Figura 3.29	Briqueta siendo pesada en vascula digital antes de ser sometida al ensayo cantabro.....	116
Figura 3.30	Maquina de Los Angeles.....	117
Figura 3.31	Se muestran las etapas de pesado de briquetas según el numero de revoluciones a) Briqueta previamente sometida al proceso de desgaste con 100 revoluciones en la Maquina de los Ángeles b) Briqueta sometida al proceso de desgaste de 200 revoluciones c) Briqueta sometida al proceso de desgaste de 300 revoluciones d) Maquina de los Ángeles utilizada para el ensayo cántabro.....	118

Figura 3.32 Mapa de El Salvador mostrando la elección del mejor cemento
asfáltico basándose en la información obtenida de la tabla 3.17.....139

INDICE DE GRAFICAS.

Gráfica 3.1 Muestra la los distintos porcentajes de desgaste sufridos por cada tipo de ligante asfaltico respecto a el numero de revoluciones a las cuales fueron sometidas las briquetas.....	122
Gráfica 3.2 Se muestran la curvas de estado para el asfalto AC-30 a 100, 200 y 300 revoluciones.....	124
Gráfica 3.3 Se muestran la curvas de estado para el asfalto AC-20 a 100, 200 y 300 revoluciones.....	125
Gráfica 3.4 Se muestran la curvas de estado para el asfalto Modificado Tipo E3 a 100, 200 y 300 revoluciones.....	125
Gráfica 3.5 Se muestran la curvas de estado para los tres tipos de asfaltos estudiados AC-30, AC-20 y MT-E3 a la severidad mas alta 300 revoluciones.....	127

INDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1	Estaciones que el SNET opera a lo largo del territorio nacional.....	14
Tabla 2.2	Estaciones meteorológicas que el SNET opera a lo largo del territorio nacional.....	15
Tabla 2.3	Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 946-82.....	39
Tabla 2.4	Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381.....	40
Tabla 2.5	Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381.....	41
Tabla 2.6	Requisitos para clasificar el asfalto por desempeño, según ASTM D 6373, Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder.....	45
Tabla 3.1	Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación.....	67
Tabla 3.2	Se muestran los datos de temperatura ambiente obtenidos mediante las graficas proporcionadas por el ESNET, ver anexo A, las temperaturas del pavimento asfaltico obtenidos en campo y la temperatura obtenida mediante la metodología SUPERPAVE a 20mm de profundidad.....	78
Tabla 3.3	Datos de coordenadas geográficas de cada punto de investigación en campo obtenidos por medio de GPS.....	79
Tabla 3.4	Rango de temperaturas para el ensayo Cántabro para la determinación de la Susceptibilidad térmica.....	103
Tabla 3.5	Muestra la forma en la cual se determino el número de briquetas a elaborar en las instalaciones de ASFALCA.....	104
Tabla 3.6	Granulometría abierta empleadas por el método UCL®.....	105

Tabla 3.7	Granulometría empleada para la elaboración de briquetas MARSHALL.....	106
Tabla 3.8	Muestra la información empleada para el proceso de curado.....	115
Tabla 3.9	Muestra los resultados obtenidos de las masas de todas las briquetas sometidas al ensayo cántabro.....	120
Tabla 3.10	Muestra los resultados obtenidos de las pérdidas por desgaste obtenidas por cada tipo de asfalto.....	121
Tabla 3.11	Promedios de los porcentajes de desgaste utilizados para graficar las curvas de estado de cada tipo de ligante asfáltico.....	122
Tabla 3.12	Grados del ligante de SUPERPAVE.....	130
Tabla 3.13	Ajuste del grado de ligante asfáltico (PG) con base en volumen y velocidad de tráfico.....	132
Tabla 3.14	Criterios de selección de grado de asfalto según Instituto del Asfalto.....	133
Tabla 3.15	Criterios de selección de ligante asfáltico basado en el Índice de Temperatura del Pavimento (PTI).....	134
Tabla 3.16	Valores extremos de temperatura promedio máxima, mínima y mensual registradas en el país.....	136
Tabla 3.17	Tipos de cemento asfáltico recomendados para diferentes zonas del país, con base en las metodologías de SUPERPAVE, Departamento de Defensa de los Estados Unidos y del Instituto del Asfalto.....	138

INDICE DE ANEXOS.

Anexo A.	Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales. Período enero/1983 – diciembre/2002.....	156
Anexo B.	Graficas de registros de Temperatura del pavimento en Zonas de Medición.....	162
Anexo C.	Certificado de análisis de asfalto AC-20 y AC -30.....	172
Anexo D.	Mapa de El Salvador especificando las zonas de medición de temperatura del pavimento asfaltico.....	177

INTRODUCCION.

El análisis de la Susceptibilidad Térmica de los cementos asfálticos empleados para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente es de gran importancia para el sostenimiento y vida útil de una carretera hecha a base de asfalto ya que el cemento asfáltico es un material termoplástico el cual reacciona de formas distintas bajo las diversas variaciones de la temperatura a la cual es sometido a lo largo de toda su vida. El Salvador por estar ubicado en una zona considerada como tropical se caracteriza por contar de forma histórica con temperaturas ambientales relativamente altas en la mayor parte de su territorio, siendo esto un factor principal para llevar a cabo una investigación acerca de la susceptibilidad térmica de los distintos tipos de cementos asfálticos comúnmente empleados en el país para la elaboración de mezclas asfálticas.

El análisis de la Susceptibilidad térmica estará basado en el Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL) el cual tiene de fundamento el ensayo Cántabro de Perdida por Desgaste, éste es un método creado para la caracterización de ligantes y no para el diseño de mezclas, dicho ensayo utiliza la máquina de los ángeles para someter probetas Marshall a condiciones especificadas por el método UCL, según la propiedad física a evaluar, y a simular las condiciones de abrasión del tráfico. Permitiendo establecer de forma científica la susceptibilidad térmica de uno a varios ligantes.

En nuestro país la producción de mezcla asfáltica en caliente para la construcción de capas de rodadura, se ha realizado utilizando cementos asfálticos clasificados por penetración (60-70) ó por viscosidad (AC-20 y AC-30); sin embargo, no se tiene registro sobre los criterios o consideraciones utilizadas para seleccionar dichos tipos de cementos asfálticos. El presente trabajo de investigación aplicada, tiene como objeto determinar el tipo de cemento asfáltico para la producción de mezclas asfálticas en caliente en El Salvador.

Capítulo I “GENERALIDADES”

Este capítulo inicia con una reseña histórica acerca de los usos del pavimento asfáltico durante la historia de forma general, los cuales han sido utilizados tanto a nivel local como internacional. Luego se da a conocer el planteamiento del problema el cual le genera un panorama al lector sobre la problemática a tratar, posteriormente se presentan tanto los objetivos como los

alcances globales de la investigación, los primeros son los que se pretenden alcanzaran al finalizar la investigación, mientras que los segundos representan lo que los investigadores lograran a lo largo de toda la investigación, inmediatamente después se detallan las diversas limitaciones que a lo largo de la investigación se tendrán y para finalizar el capítulo se presenta la justificación, la cual es el motivo por el cual se ha realizado la investigación, dicho motivo dará al lector un claro panorama de cómo se abordara la problemática.

Capítulo II “BASE TEORICA”

Se expone las condiciones climáticas de El Salvador, los conceptos básicos de pavimento, generalidades del cemento asfáltico y de la mezcla asfáltica, sistemas de clasificación del cemento asfáltico, tipologías de las mezclas asfálticas y se finaliza el capítulo con los tipos de fallas que pueden ocurrir en los pavimentos de concreto asfáltico.

Capítulo III “ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS UTILIZADOS EN EL SALVADOR”

Se presenta el registro histórico de la temperatura superficial del pavimento asfáltico en El Salvador, se expone la evaluación directa de las temperaturas del pavimento asfáltico en las carreteras de El Salvador mediante los métodos que los investigadores abordaron (método SUPERPAVE y método de campo), la presentación de los resultados obtenidos mediante los dos métodos mencionados anteriormente y un análisis a los resultados obtenidos, se detalla la influencia de la temperatura sobre las propiedades físicas de los cementos asfálticos, las características térmicas de los materiales que forman la mezcla asfáltica en caliente, se presenta la determinación de la Susceptibilidad térmica mediante el método UCL, la presentación de los resultados de dicha propiedad de los asfaltos y un análisis de los resultados obtenidos, se expone tres metodologías para la selección del mejor ligante asfáltico para la elaboración de mezclas asfálticas, se presenta la selección de los mejores cementos asfálticos para diversas zonas del territorio salvadoreño y se finaliza el capítulo presentando una guía para la selección de cemento asfáltico de acuerdo a la zona de emplazamiento del proyecto.

Capítulo IV “CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”

Se ostentan las conclusiones concernientes al presente documento y las recomendaciones de los aspectos más importantes.

CAPITULO I. GENERALIDADES.

1.1 ANTECEDENTES.

USOS DEL ASFALTO DURANTE LA HISTORIA.

La palabra asfalto, deriva del acadio proveniente de la lengua hablada en Asiria, en las orillas del Tigris, entre los años 1400 y 600 A.C.

El betún natural (El betún es la fracción residual resultante de la destilación fraccionada del petróleo) fue descubierto a mediados del siglo XVI, por Cristóbal Colon, siguiendo una serie de descubrimientos de lagos de betún natural en diversas partes del mundo por otros personajes, a partir de estos yacimientos descubiertos se elaboró el “mastic de asfalto”, aplicando a revestimientos de caminos y senderos. (Anonimo., Materiales para pavimentos, 2000)

El primer antecedente en el cual se uso un tipo de asfalto fue en Francia en 1852, la construcción de la carretera París-Perpiñán utilizo el asfalto Val Travers, significando el comienzo de una nueva forma de construcción vial. En 1869, se introduce en Londres (con asfalto de Val de Travers) y en 1870 en Estados Unidos con similar ligante. Desde esta época, el “asfalto” se implanto sólidamente en las vías urbanas y propicio su uso vial. (Anonimo., Materiales para pavimentos, 2000)

A partir del año 1902, se inicia el empleo de asfaltos destilados de petróleo en los Estados Unidos, que por sus características de pureza y economía en relación a los asfaltos naturales, constituye en la actualidad la principal fuente de abastecimiento. Finalmente, en México, desde 1920, se han realizado diversas pruebas con varios materiales para ser utilizados en riegos superficiales y profundos. Las emulsiones asfálticas se utilizaron por primera vez en las carreteras en los años treinta, pero fue hasta los años setenta cuando debido a la crisis energética, se incrementan los estudios de este tipo de materiales asfálticos llamados emulsiones.

En la actualidad los estudios que se le realizan al pavimento asfáltico con la finalidad de mejorar sus características, su comportamiento en servicio y la longevidad del mismo son muy diversos y uno de ellos es el estudio de la susceptibilidad térmica o ahuellamiento, sin embargo en el área Centro Americana el interés hacia este tipo de fenómeno ha sido muy limitada mientras que para el área del Norte y Sur América existen países como Estados Unidos, Chile, Venezuela y Argentina en los cuales sus Universidades han hecho un esfuerzo en darle la importancia al fenómeno de la susceptibilidad térmica. (Anonimo., Influencia de la granulometria en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas., 2008)

Entre los antecedentes relacionados tenemos:

Estudios realizados por el grupo de investigación del Departamento de Transporte de Estados Unidos, utilizando una mezcla asfáltica compuesta por 8% de agregado granular, 37% de arena granular y 47% de arena fina, mostraron que las granulometrías finas y granulares experimentan profundidades de deformación permanente (ahuellamiento) de 7% y 10% mayores que la granulometría propuesta por la ASTM de material que pasa por el tamiz N°4 y es retenido en el tamiz N° 10.

Investigadores de la Universidad de Berkeley analizaron el efecto del contenido de filler mineral sobre la formación de “deformación permanente”. Para el estudio utilizaron dos tipos de porcentaje de filler, el primero un 2.5% y el segundo el 5.5% y encontraron que para menores contenidos de finos (2.5%) el número de repeticiones para una deformación determinada fue de 16.476 ciclos, mientras que para el contenido de 5.5% fue de 13.886 con lo cual se obtiene una diferencia de 119%

El estudio realizado con ensayos de deformación creep determino que en mezclas asfálticas elaboradas con agregados angulares, las deformaciones plásticas son menores que cuando se utiliza agregado con caras lisas o de canto rodado procedentes de río, sin triturar.

Investigadores del Centro Nacional de Tecnología del Asfalto de la Universidad de Auburn estudiaron el efecto de los vacíos en el agregado mineral sobre el potencial de generación de deformación permanente mediante el uso del equipo Asphalt Pavement Analyzer, y encontraron que el potencial está relacionado con el espesor de la capa asfáltica. Un incremento en los vacíos y en el espesor de la capa asfáltica causa un incremento en las deformaciones permanentes para mezclas con granito y caliza, mientras que causan un decremento en las mezclas con agregados de gran tamaño.

Otros autores, como Monismith y Linden, encontraron que grandes contenidos de asfalto producen bajos contenidos de vacíos en la mezcla y como consecuencia un incremento potencial en la susceptibilidad a la deformación permanente. (Anonimo., Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas., 2008)

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En El Salvador, la construcción de carreteras de pavimento flexible presenta muchas deficiencias en términos de diseño de las carpetas asfálticas que se utilizan como capa de rodadura. Estas deficiencias se presentan en forma de fallas

estructurales muchas veces de naturaleza irreversible que afectan el buen desempeño que se espera tengan este tipo de obras en campo.

Existen muchos vacios o temas que no han sido estudiados a profundidad para garantizar que una carretera de pavimento asfaltico trabaje como es debido, esto a pesar que existen muchas herramientas que optimizan los métodos de diseño de las mezclas asfálticas a utilizar.

El termino pavimento asfáltico se refiere a una mezcla sólida y compacta de ligantes asfálticos y de agregados pétreos que mayormente es empleada para construir el pavimento de las calzadas. Sus características físicas más destacadas son la viscosidad, su pegajosidad y su intenso color negro.

Uno de los aspectos que es descuidado al momento de realizar un diseño de mezclas asfálticas es la forma en que los cambios de temperatura afectan al ligante asfáltico y a la mezcla asfáltica en general. Esto es conocido como susceptibilidad térmica y se define como el cambio de consistencia y de ciertas propiedades de los ligantes asfálticos respecto de las variaciones de temperatura de servicio que experimentan en el campo (Rioja V., 2007).

Para ilustrar esta idea se considera que la dureza de un asfalto tiene un comportamiento lineal en un grafico consistencia-temperatura (Ver figura 1.1)

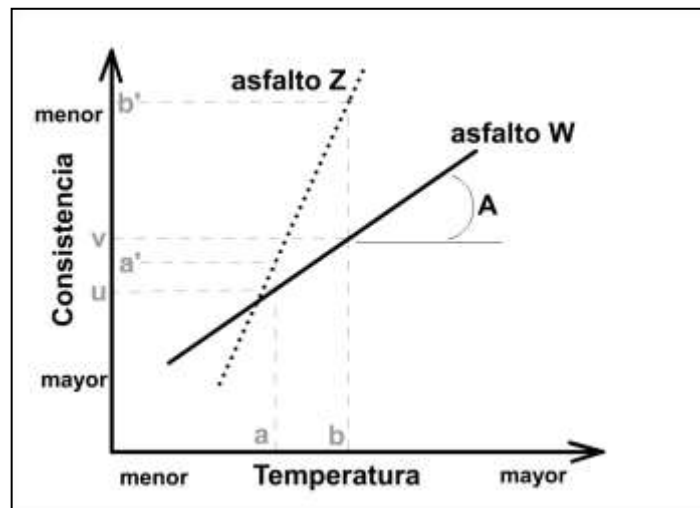


Figura 1.1 Concepto susceptibilidad térmica (Rioja V., 2007)

En el grafico se puede observar que el ligante Z pierde más consistencia que el ligante W para un mismo aumento de temperatura. Cuando la temperatura aumenta de a hasta b la consistencia del ligante Z se reduce de a' hasta b' por otro lado para el mismo aumento de temperatura (a-b) el ligante W reduce su

consistencia desde u hasta v. Este fenómeno podría describirse como que el ligante Z es más susceptible térmicamente que el ligante W.

Una característica que se utiliza como parámetro para medir la susceptibilidad térmica es la pendiente de la recta de cada ligante en la grafica consistencia-temperatura. A mayor pendiente existe una mayor sensibilidad a los cambios de temperatura.

Sin embargo hasta ahora no se ha especificado cuales son las consecuencias que conlleva esa susceptibilidad térmica de los ligantes asfálticos para ello es necesario determinar el comportamiento de los mismos bajo estos fenómenos.

Comportamiento de los ligantes asfálticos

Los asfaltos usados en pavimentos bituminosos están formados químicamente por complejas combinaciones de hidrocarburos, por el hecho de tener entre el 90% al 95% de hidrocarburos, los asfaltos son propensos al envejecimiento por oxidación, esto provoca cambios en la estructura química de los asfaltos.

Comportamiento viscoso del asfalto.

Por las características visco-elásticas del asfalto, el mismo presenta una variedad de comportamiento, tanto ante cargas como a temperatura. A alta temperatura es fluido y tiene un comportamiento plástico mientras que a baja temperatura, el asfalto tiende a ser rígido y elástico. A temperaturas intermedias actúa como una combinación de los dos fenómenos.

Comportamiento del asfalto a alta temperatura.

En condiciones calientes o bajo cargas aplicadas suavemente (movimiento lento de vehículos pesados), el asfalto actúa como un líquido viscoso. Bajo estas circunstancias, el agregado es la parte de la mezcla asfáltica que soporta la carga, mucho más que el asfalto.

Los asfaltos líquidos exhiben comportamiento plástico porque una vez empiezan a fluir, no retornan a su posición original. Esta es la razón del porque en tiempos calientes algunas mezclas asfálticas menos estables, fluyan bajo la carga de las llantas (cargas repetidas) y producen una acumulación de deformación al paso de vehículos (rutting).

El rutting en los pavimentos asfálticos es también influenciado por las características del agregado.

Comportamiento del asfalto a bajas temperaturas.

En épocas frías o bajo cargas aplicadas rápidamente, el asfalto actúa como un sólido elástico. Un sólido elástico posee un esfuerzo último el cual, cuando es cargado más allá de su nivel, puede fracturarse.

Las grietas por temperatura pueden ocurrir en los pavimentos asfálticos en tiempos fríos cuando una carga térmica es aplicada por los esfuerzos de tensión internos que pueden suceder en el pavimento cuando se contrae, mientras está siendo restringida por las capas inferiores (base y sub base).

Comportamiento del asfalto a temperaturas intermedias.

La mayoría de los pavimentos en El Salvador son construidos en lugares donde experimentan temperaturas moderadas e intermedias la mayor parte del tiempo, por lo que experimentan temperaturas bajas o altas en periodos relativamente cortos de tiempo cada año. A estas temperaturas los ligantes asfálticos presentan características de un líquido viscoso y de un sólido elástico. Debido a este comportamiento el asfalto, para el ingeniero civil, es un material extremadamente complicado para entenderlo y explicarlo.

Una vez definidos los conceptos básicos de la investigación y la importancia de los mismos es de suma importancia definir que se pretende lograr con la investigación del tema.

El propósito de la investigación es determinar la susceptibilidad térmica de los ligantes asfálticos utilizados actualmente en la construcción de carreteras de pavimento flexible en El Salvador y definir las mejores alternativas de ligantes para determinadas zonas del territorio nacional donde las temperaturas de servicio de los pavimentos son considerablemente altas, para con ello disminuir la influencia de la temperatura en el comportamiento de las mezclas asfálticas y las fallas debido a temperatura.

En el país el diseño de mezclas asfálticas se realiza indistintamente de la zona donde será construida la carretera, dejando de lado varios factores considerados muy importantes para garantizar una obra con desempeño óptimo en campo, tales como características climáticas de la zona de construcción, tipo de carga a soportar, características térmicas de los componentes de la mezcla asfáltica, entre otros lo que supone a criterio del grupo de investigación un vacío a tomar en cuenta para mejorar el desempeño de los pavimentos flexibles de El Salvador.

La investigación abarcará la totalidad del territorio nacional y se realizará en el verano del 2011, para determinar las zonas con mayores registros de temperatura ambiente y por ende más propensas a afectar el comportamiento de las superficies de pavimento asfáltico.

Sin embargo resulta la interrogante de cuáles son las zonas de mayores temperaturas en el país, para ello se deberán tomar puntos representativos en el territorio nacional que permitan al grupo investigador elaborar los registros más significativos de temperaturas en el país.

Para el desarrollo del tema se disponen de valiosos recursos que son brindados por varias instituciones gubernamentales y privadas que brindan asesoría y apoyo al grupo de investigación, el recurso más importante es la fuerza de trabajo del grupo, este constara de 3 estudiantes egresados de Ingeniería Civil de la UES - FMOcc. Así como también la asesoría de la empresa Asfaltos de Centro América, ASFALCA S.A de C.V. que brinda asesoría técnica y recursos especializados para el desarrollo de ensayos de laboratorio necesarios para el desarrollo de la tesis, de hecho fue ASFALCA S.A de C.V. quien sugirió el tema de investigación y puso a disposición todos los recursos necesarios para su desarrollo. Así mismo la asesoría de la UES por medio del docente director asignado por el Departamento de Ingeniería, sin olvidar a instituciones como SNET que posee un amplio registro de las condiciones climáticas del territorio salvadoreño que serán de mucha utilidad para el desarrollo de la tesis.

Una de las partes fundamentales del desarrollo de la investigación será la determinación de la temperatura de servicio de las carreteras de pavimento asfáltico y para ello se utilizaran dos métodos de determinación de la temperatura del pavimento, una proporcionada por el sistema SUPERPAVE, desarrollado por la SHRP, el cual será explicado en más detalle más adelante y un método de muestreo en campo con equipo de precisión proporcionado por ASFALCA S.A de C.V.

El conjunto de los recursos disponibles y las aptitudes del grupo de investigación determina que el desarrollo de la investigación es factible y ajustado a los recursos que se disponen.

1.3 OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

- Explicar la importancia de la susceptibilidad térmica como parámetro de selección de los ligantes asfálticos y su influencia en el deterioro temprano en las carreteras de El Salvador.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Establecer la temperatura ambiental promedio máximas y mínimas para las zonas central, para central, occidental y oriental de acuerdo a datos estadísticos de las estaciones meteorológicas del Salvador.
- Determinar y analizar la temperatura de servicio del pavimento asfáltico a 2cm de su superficie para carreteras en funcionamiento en diferentes zonas en todo el territorio nacional.
- Formular una guía para la selección de cemento asfáltico que permita al diseñador elegir la mejor opción del tipo de ligante a utilizar en base a la zona geográfica donde se utilizara el pavimento asfáltico tomando como criterio las características climáticas de dicha zona y el desempeño que se espera de la mezcla bajo las condiciones de trabajo.
- Especificar el ligante más adecuado para la elaboración de mezclas asfálticas de acuerdo a la zona de emplazamiento del proyecto mediante un mapa del territorio salvadoreño, donde se indique el tipo de ligante a utilizar, generado de acuerdo a las condiciones climáticas de las zonas de estudio.

1.4 ALCANCES GLOBALES.

Los alcances globales que se pretenden lograr a lo largo de todo el proyecto son los siguientes:

- La investigación se centrara en la determinación de la susceptibilidad térmica en los pavimentos asfálticos, utilizados en El Salvador para el desarrollo de los proyectos viales.
- Se determinara la temperatura de trabajo de los pavimentos asfálticos que se encuentran en servicio en la actualidad, se obtendrá un promedio de temperaturas por cada una de las cuatro zonas que dividen al país (Occidente, Central y Oriental)
- Se utilizara el centro de investigaciones de ASFALCA para la realización de ensayos de laboratorio.
- Se realizaran pruebas para la clasificación de los ligantes y mezclas asfálticas.
- Se establecerán las consecuencias en el comportamiento de las carreteras de asfalto cuando no se toma en cuenta en el diseño la importancia del ahuellamiento producto de las altas temperaturas de la superficie y la acción del tráfico que en ellas circula.
- Elaborar un mapa del territorio salvadoreño donde se muestre gráficamente los tipos de asfalto recomendados en base a la zona geográfica del país y la temperatura máxima en dicho punto.

- Las mediciones de temperatura en campo serán realizadas en 3 puntos del país de acuerdo a las zonas en que será dividido el territorio nacional. Para la obtención de la temperatura del pavimento asfáltico en campo existe únicamente un método en el país, el cual consiste en abrir un orificio en el pavimento llenarlo de aceite térmico y colocar un termómetro para tomar las lecturas de la temperatura que existe en el pavimento a una profundidad de 20 mm. Para esta operación se necesita hacer la prueba en un día soleado y a lo largo del periodo de tiempo de 9:00 a.m. y las 3:00 p.m. y luego generar un promedio de ese periodo.
- Existe un método para obtener la temperatura del pavimento mediante una fórmula matemática, esta fórmula es proporcionada por el método SUPERPAVE¹ el cual fue desarrollado por el SHRP² en 1987 y se utiliza para realizar la conversión de temperatura ambiente a temperatura del pavimento (T_{20mm}) y exige tomar la temperatura promedio ambiente de los últimos 25 años las cuales son registradas por las estaciones meteorológicas de cada país.

Esta fórmula de conversión es la siguiente:

$$T_{20mm} = (T_{aire} - 0.00618lat^2 + 0.2289lat + 42.2)(0.9545) - 17.78$$

¹ Superior PERforming Asphalt PAVement

² Strategic Highway Research Program

1.5 LIMITACIONES.

- Debido al número de departamentos en que está dividido el territorio salvadoreño, se dificulta poder tomar registros de temperatura del pavimento en cada uno de ellos, por lo que las pruebas de campo serán realizadas por zonas políticas, o sea zona Occidental, Central y Oriental.
- El número de tomas de temperatura en campo se limitará a 10 perforaciones en un tramo de un kilómetro, debido a que esta prueba debe realizarse en días soleados y a determinada hora, y se considera que las pruebas fuera de estas condiciones no son representativas del fenómeno que se pretende estudiar.
- El número y tipo de ensayos de laboratorio estará limitado por la administración de ASFALCA S.A de C.V. por los costos que representan cada uno de los cuales correrán a cargo de la empresa, y por el tiempo de uso de laboratorio ya que se interfiere con las actividades diarias de la misma.
- Las tomas de temperatura en campo se realizarán solamente en departamentos con la mayor temperatura ambiente ya que el fenómeno de la susceptibilidad térmica se manifiesta principalmente por las variaciones de la temperatura de servicio, estos departamentos serán Sonsonate por la zona Occidental, La Paz en la zona Para Central, La Libertad en la zona Central y La Unión en la zona Oriental.
- El desarrollo del trabajo de grado no incluye métodos de diseño ya que no es el objetivo que se persigue con la investigación si no que presenta una herramienta que sea de utilidad para el diseñador de mezclas asfálticas.
- Para la evaluación de mezclas asfálticas en laboratorio se escogerá un tipo de ligante comercial el cual es comúnmente utilizado en El Salvador.

1.6 JUSTIFICACION.

La construcción de carreteras con pavimento asfáltico en El Salvador presenta algunas deficiencias en la actualidad, ya que no se toman en cuenta la susceptibilidad térmica del pavimento asfalto y la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de servicio de la capa de rodadura.

Por ejemplo una carretera de asfalto que está ubicada en una zona donde su temperatura máxima ambiente es de 32 °C y sin embargo la temperatura de la capa de rodamiento podría estar entre los 62° a 65°C.

Una de las características más importantes en el comportamiento de los ligantes asfálticos es la viscosidad, a mayor temperatura el asfalto presenta una menor viscosidad lo que da lugar a deformaciones plásticas (permanentes) que pueden disminuir la vida útil de la carretera.

En el país existen zonas con temperaturas ambientales muy altas durante el verano especialmente en la zona costera y la zona oriental lo que implica que las carreteras de asfalto que se construyen en esas zonas están expuestas a altas temperaturas de servicio generando hundimientos o roderas en la dirección del tráfico, ya que no existe ninguna herramienta que permita elaborar un diseño de pavimento que tome en cuenta la zona donde será construido y las características climáticas de la misma, lo que podría optimizar el desempeño de la capa de rodamiento y disminuir las deformaciones plásticas debido a fallas en la capa de asfalto.

Este tipo de fallas son irreversibles y aunque son consecuencia de una combinación de la resistencia de los agregados pétreos y el ligante asfáltico empleado, ocurren típicamente en verano lo que da pie a suponer que las altas temperaturas influyen de forma negativa para que estas fallas aparezcan.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto se ve la necesidad de elaborar una investigación bibliográfica y experimental que permita determinar las mejores propiedades de los materiales que deberán ser utilizados en una obra de pavimento asfáltico para determinadas zonas geográficas de El Salvador.

Existe un interés de tipo social al elaborar la investigación ya que servirá de guía para el diseño de las capas de rodamiento en las carreteras de pavimento asfáltico en El Salvador.

CAPITULO II. BASE TEORICA.

2.1 CONDICIONES CLIMATICAS EN EL SALVADOR.

2.1.1 ESTACIONES METEREOLÓGICAS DE EL SALVADOR.

La Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA) constituye la entidad científica y técnica del Estado Salvadoreño encargada de proporcionar la información y las recomendaciones de referencia para que las instituciones responsables ejecuten medidas conforme a sus competencias y capacidades.

La DGOA está conformado por:

- Servicio Meteorológico Nacional.
- Servicio Hidrológico Nacional.
- Servicio Geológico Nacional.

Red de Estaciones en El Salvador.

TIPO DE ESTACION	Zona Occidental	Zona Central	Zona Para-central	Zona Oriental	TOTAL
CLIMATOLOGICA	9	6	5	6	26
PLUVIOMETRICA	26	19	17	28	90
SINOPTICA AUTOMATICA	2	1	0	2	5
CLIMATOLOGICA AUTOMATICA	0	2	1	0	3
PLUVIOMETRICA AUTOMATICA	0	0	0	2	2
PLUVIOGRAFICA SEMI AUTOMATICA	0	0	0	1	1
TOTAL					127

Tabla 2.1 Estaciones que el SNET opera a lo largo del territorio nacional.³

¿Qué es una estación meteorológica?

Es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos.

³ Fuente: La Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), Servicio Meteorológico Nacional.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS PRINCIPALES DE EL SALVADOR.

Código	Estaciones	Latitud Norte	Longitud Oeste	Elevación (m.s.n.m.)
ZONA OCCIDENTAL				
A-12	Santa Ana, UNICO	13° 58.9'	89° 32.9'	685
A-15	Guija	14° 13.7'	89° 28.7'	485
A-18	Los Andes	13° 52.5'	89° 38.7'	1770
A-27	Candelaria La Frontera	14° 07.2'	89° 39.1'	700
A-31	Los Planes de Montecristo	14° 23.9'	89° 21.6'	1971
H-8	Ahuachapán	13° 56.6'	89° 51.6'	725
H-14	La Hachadura	13° 51.6'	90° 05.4'	30
T-6	Acajutla	13° 34.4'	89° 50.0'	15
T-24	Los Naranjos	13° 52.5'	89° 40.5'	1450
ZONA CENTRAL				
G-3	Nueva Concepción	14° 07.5'	89° 17.4'	320
G-4	La Palma	14° 17.5'	89° 09.7'	1000
G-13	Las Pilas	14° 21.9'	89° 05.4'	1960
L-4	San Andrés	13° 48.5'	89° 24.4'	460
L-27	Chiltiupán	13° 35.7'	89° 28.9'	680
S-10	Ilopango	13° 41.9'	89° 07.1'	615
ZONA PARACENTRAL				
C-9	Cojutepeque	13° 43.2'	88° 55.6'	880
V-9	Puente Cuscatlán	13° 36.1'	88° 35.6'	20
B-1	Chorrera del Guayabo	13° 59.8'	88° 45.4'	190
B-6	Sensuntepeque	13° 52.2'	88° 39.0'	650
B-10	Cerrón Grande	13° 56.3'	88° 47.1'	200
ZONA ORIENTAL				
M-24	San Miguel UES	13° 26.3'	88° 09.5'	117
U-6	Santiago de María	13° 29.1'	88° 28.3'	920
Z-2	San Francisco de Gotera	13° 41.8'	88° 05.4'	250
Z-3	Perquin	13° 57.5'	88° 09.7'	1225
N-2	La Unión, Corsain	13° 19.9'	87° 52.9'	35

Tabla 2.2 Estaciones meteorológicas que la DGOA opera a lo largo del territorio nacional.⁴

⁴ Fuente: La Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), Servicio Meteorológico Nacional, Centro de Información Agrometeorológica, boletín anual climático 2009.

2.1.2 DETERMINACION DE LA TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL EN EL SALVADOR.

A continuación se presentan el mapa del territorio nacional proporcionados por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA).

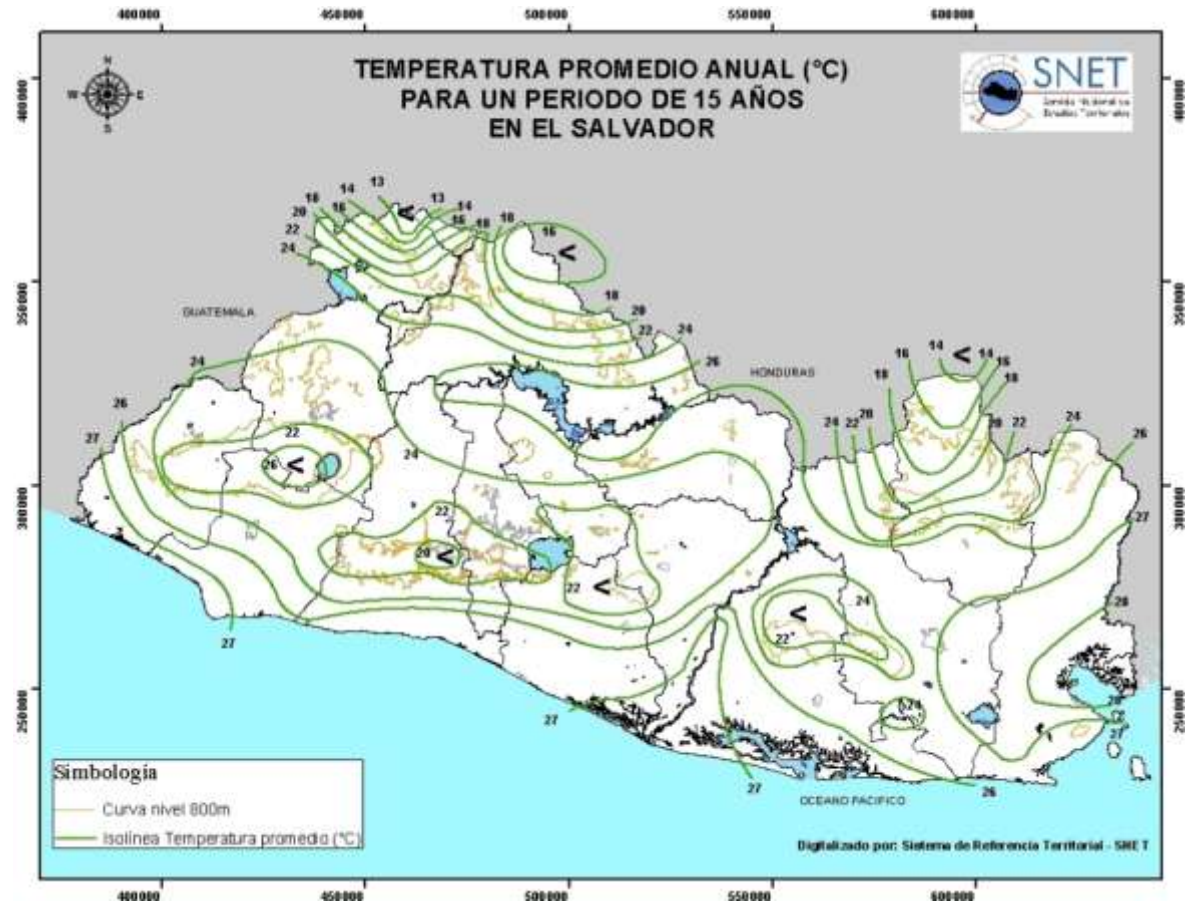


Figura. 2.1 Mapa del territorio nacional que muestra la temperatura promedio anual para un periodo de 15 años.⁵

⁵ Fuente: Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), Servicio Meteorológico Nacional, Centro de Información Agrometeorológica.

2.1.3 CARACTERIZACION CLIMATICA DEL TERRITORIO DE EL SALVADOR.⁶

El Salvador está situado en la parte exterior del cinturón climático de los Trópicos, es por ello que durante el año, los cambios de temperatura son pequeños, en contraste a las lluvias que muestran grandes oscilaciones.

Las condiciones climáticas se presentan en dos épocas, la seca (de noviembre a marzo) en la cual ocurren las máximas temperaturas, especialmente en los meses de marzo y abril. La época lluviosa comprende los meses de mayo a octubre y entre la finalización de una e inicio de la otra existe un periodo de transición con una duración aproximada de un mes.

Los vientos en los Trópicos poseen la característica particular es el ingreso de los *vientos alisios*⁷, predominantemente procedentes del norte. Así mismo el país presenta un buen desarrollo del sistema de brisas del mar en las planicies costeras, moviéndose hacia los valles y planicies internas después del medio día. Específicamente en Centro América, predominan los vientos nortes que transportan masas de aire fresco hacia la región, provenientes del norte, generando los conocidos vientos nortes.

El comportamiento de la lluvia en el país, es típicamente determinado por el desarrollo de cantidades máximas de precipitación unas semanas después del paso del sol sobre el *cenit*⁸ (al mediodía el sol brilla perpendicularmente, no proyecta sombra).

EL CLIMA EN EL SALVADOR ESTÁ CLASIFICADO EN LAS SIGUIENTES ZONAS CLIMÁTICAS.

- ❖ Sabana tropical caliente o tierra caliente con elevaciones desde 0 a 800 m.s.n.m.
- ❖ Sabana tropical calurosa o tierra templada con elevaciones desde 800 a 1200 m.s.n.m.
- ❖ Tierras frías cuyas elevaciones van desde 1200 a 2700 metros sobre el nivel medio del mar.

⁶ Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Boletín Anual Climático 2009.

⁷ Vientos que soplan regularmente en los océanos Pacífico y Atlántico, en las zonas tropicales hacia el ecuador.

⁸ Punto más alto en el cielo con relación al observador.

2.2 CONCEPTOS BASICOS SOBRE PAVIMENTOS.⁹

2.2.1 DEFINICION DE PAVIMENTO.

Un pavimento está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen con materiales técnicamente apropiados y adecuadamente compactados (*ver figura 2.2*). Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la sub-rasante de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir los esfuerzos que las cargas repetidas de transito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura de pavimento. (*Ing Alfonso Montejo Fonseca , 2002, págs. 1-2*)



Figura. 2.2 Sección típica de un pavimento.

2.2.2 CARACTERISTICAS QUE DEBE REUNIR UN PAVIMENTO.

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requerimientos:

- ❖ Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el transito.
- ❖ Ser resistente ante los agentes de intemperismo¹⁰.
- ❖ Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos, por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.

⁹ Ingeniería de pavimentos para carreteras (Ing Alfonso Montejo Fonseca , 2002)

¹⁰ Es el proceso de transformación mediante la acción climática de las rocas en suelo.

- ❖ Debe presentar una seguridad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permita una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- ❖ Debe ser durable.
- ❖ Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- ❖ El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influyen en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- ❖ Debe ser económico.
- ❖ Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

2.2.3 TIPOS DE PAVIMENTO.

En nuestro medio existen distintos tipos de pavimentos, entre ellos se puede mencionar: *pavimentos flexibles, pavimentos semirrígidos, pavimentos rígidos y pavimentos articulados.* (Ing Alfonso Montejo Fonseca , 2002, págs. 3-7)

2.2.3.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Este tipo de pavimento está formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y sub-base (*ver figura 2.2*).

FUNCIONES DE LAS CAPAS DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.

La sub-bese granular.

- **Función económica.** Una de las principales funciones de esta capa es netamente económica; en efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos en la sub-rasante sea igual o menor que su propia resistencia, puede ser construido con materiales de alta calidad; sin embargo, es preferible distribuir las capas más calificadas en la parte superior y luego colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad la cual es frecuentemente la más barata. Esta solución puede traer consigo un aumento en el espesor total del pavimento y no obstante, resulta más económica.
- **Capa de transición.** La sub-base bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la sub-rasante y por otra

parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la sub-rasante la contaminen menoscabando su calidad.

- **Disminución de las deformaciones.** Algunos cambios volumétricos de la capa sub-rasante, generalmente asociados a cambios en su contenido de agua (expansiones), o a cambios extremos de temperatura (heladas), puede absorberse con la capa sub-base, impidiendo que dichas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.
- **Resistencia.** La sub-base debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidas a un nivel adecuado a la sub-rasante.
- **Drenaje.** En muchos casos la sub-base debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar.

La base granular.

- **Resistencia.** La función fundamental de la base granular de un pavimento consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la sub-base y a la sub-rasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada.
- **Función económica.** Respecto a la carpeta asfáltica, la base tiene una función económica análoga a la que tiene la sub-base respecto a la base.
- **Carpeta.**
- **Superficie de rodamiento.** La carpeta debe proporcionar una superficie uniforme al tránsito, de textura y color conveniente y resistir los efectos abrasivos del tránsito.
- **Impermeabilidad.** Hasta donde sea posible, debe impedir el paso del agua al interior del pavimento.
- **Resistencia.** Su resistencia a la tensión complementa la capacidad estructural del pavimento.

2.2.3.2 PAVIMENTOS SEMIRRÍGIDOS.

Este tipo de pavimento guarda la misma estructura de un pavimento flexible, una de sus capas se encuentra rigidizada artificialmente con un aditivo que puede ser: asfalto, emulsión, cemento, cal y químicos. El empleo de estos aditivos tiene la finalidad básica de corregir las propiedades mecánicas de los materiales locales que no son aptos para la construcción de las capas del pavimento, teniendo en

cuenta que los adecuados se encuentran a distancias tales que encarecerían notablemente los costos de construcción.

2.2.3.3 PAVIMENTOS RÍGIDOS.

Son aquellos que fundamentalmente están constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la sub-rasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina sub-base del pavimento rígido. Debido a la alta rigidez del concreto hidráulico así como su elevado coeficiente de elasticidad, la distribución de los esfuerzos se produce en una zona muy amplia. Además como el concreto es capaz de resistir, en cierto grado, esfuerzos a la tensión el comportamiento de un pavimento rígido es suficientemente satisfactorio aun cuando existan zonas débiles en la sub-rasante. La capacidad estructural de un pavimento rígido depende de la resistencia de las losas y, por lo tanto, el apoyo de las capas subyacentes ejerce poca influencia en el diseño del espesor del pavimento.

FUNCIONES DE LAS CAPAS DE UN PAVIMENTO RÍGIDO.

La sub-base.

- La función más importante es la de impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento. Se entiende por bombeo a la fluencia de material fino con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración del agua por las juntas de las rocas. El agua que penetra a través de las juntas licua el suelo fino de la sub-rasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes a través de las losas.
- Servir como capa de transición y suministrar un apoyo uniforme, estable y permanente del pavimento.
- Facilitar los trabajos de pavimentación.
- Mejorar el drenaje y reducir por tanto al mínimo la acumulación de agua bajo el pavimento.
- Ayudar a controlar los cambios volumétricos de la sub-rasante y disminuir al mínimo la acción superficial de tales cambios volumétricos sobre el pavimento.
- Mejorar en parte la capacidad de soporte del suelo de la sub-rasante.

Losa de concreto.

La función de la losa del pavimento rígido son las mismas que las del pavimento flexible, mas la función estructural de soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que le apliquen.

2.2.3.4 PAVIMENTOS ARTICULADOS.

Los pavimentos articulados están compuestos por una capa de rodadura que está elaborada con bloques de concreto prefabricados, llamados adoquines, de espesor uniforme e iguales entre sí. Esta puede ir sobre una capa delgada de arena la cual, a su vez, se apoya sobre una capa de base granular o directamente sobre la sub-rasante, dependiendo de la calidad de esta y de la magnitud y frecuencia de las cargas que circularan por dicho pavimento.

2.3 GENERALIDADES DEL ASFALTO.¹¹

El uso del asfalto para la construcción de pavimentos en carreteras comenzó a finales del siglo pasado, creciendo rápidamente con la expansión de la industria automotriz. Desde entonces la tecnología del asfalto ha presentado grandes avances, hoy día los equipos y los procedimientos para construir estructuras de pavimento asfáltico son bastante sofisticados.

Esta sección trata sobre el asfalto abordando sus antecedentes, su historia, su composición sus propiedades, características procedimientos de obtención, etc.

2.3.1 HISTORIA DEL ASFALTO.

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos. La palabra asfalto deriva del acadio, lengua hablada en Siria, en las orillas del Tigris superior, entre los años 1400 y 600 A.C. en esta zona se encuentra la palabra “Sphalto” que significa “lo que hace caer”. Estudios arqueológicos indican que es uno de los materiales constructivos más antiguos que el hombre ha utilizado.

En el sector de la construcción, la utilización más antigua se remonta aproximadamente al año 3200 A.C. excavaciones efectuadas en Tell Asmer, a 80 km al noroeste de Bagdad, permitieron constatar que los Sumerios habían

¹¹ Ingeniería de pavimentos para carreteras (Ing Alfonso Montejó Fonseca , 2002)

utilizado un mastic de asfalto para la construcción, dicho mastic, compuesto por betún, finos minerales y paja, se utilizaba en la pega de ladrillos, en la realización de pavimentos interiores y como revestimiento impermeable. Los egipcios le habían encontrado otra aplicación al betún, como relleno del cuerpo en trabajos de momificación, práctica que se extiende aproximadamente hasta el año 300 A.C. Los árabes desarrollaron un uso medicinal al asfalto, el cual se extendió hasta nuestra época. *(Instituto del Asfalto, 1973, págs. 22-23)*

El betún natural fue descubierto a mediados del siglo XVI, en la isla de Trinidad, por Cristóbal Colón, un siglo más tarde, Sir Walter Raleigh quedó asombrado ante este lago de betún y tomó posesión de él para la Corona Británica. Mientras tanto, en 1712, el griego Eirini D'Eyrinis hizo otro descubrimiento: el yacimiento de asfalto de Val de Travers en Suiza y luego el yacimiento de Seyssel en el Valle de Ródano, a partir de estos yacimientos se elaboró el “mastic de asfalto”, aplicado a revestimientos de caminos y senderos.

Sin embargo, el primer antecedente en el cual se usó un tipo de asfalto fue en Francia en 1802. En 1824, la firma Pillot et Eyquem comenzó a fabricar adoquines de asfalto, que en 1837 se utilizaron para pavimentar la Plaza de la Concordia y los Campos Elíseos en París.

En 1852, la construcción de la carretera Paris – Perpiñan utilizó el asfalto Val Travers, significando el comienzo de una nueva forma de construcción vial. En 1869, se introduce el procedimiento en Londres (con asfalto de Val de Travers), y en 1870 en Estados Unidos con similar ligante. Desde esta época, el “asfalto” se implantó sólidamente en las vías urbanas y propició su uso vial. La construcción del primer pavimento, tipo Sheet Asphalt, ocurre en 1876 en Washington D.C., con asfalto natural importado. En 1900, aparece la primera mezcla en caliente, utilizada en la rué du Louvre y en la Avenue Victoria en París, la cual fue confeccionada con asfalto natural de la isla de Trinidad. A partir del año 1902, se inicia el empleo de asfaltos destilados de petróleo en los Estados Unidos, que por sus características de pureza y economía en relación a los asfaltos naturales, constituye en la actualidad la principal fuente de abastecimiento. *(Instituto del Asfalto, 1973, págs. 22-23)*

2.3.2 ¿QUÉ ES UN ASFALTO?

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales.

Al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida. Estos pueden tener dos orígenes; los derivados de petróleos y los naturales. **(N-CMT-4-05-001/00 Materiales para Pavimentos, Calidad de Materiales Asfálticos, SCT. Pág. 1.)**

Los asfaltos naturales, se han producido a partir del petróleo, pero por un proceso natural de evaporación de las fracciones volátiles, dejando las asfálticas solamente. Estos pueden encontrarse como escurrimientos superficiales en depresiones terrestres, dando origen a los lagos de asfalto, como los de las islas Trinidad y Bermudas. También aparecen impregnando los poros de algunas rocas, denominándose rocas asfálticas. Así también se encuentran mezclados con elementos minerales, como pueden ser arenas y arcillas en cantidades variables, debiendo someterse a posteriores procesos de purificación, para luego poder ser utilizadas en pavimentación. En la actualidad, no es muy utilizado este tipo de asfalto ya que carece de uniformidad y pureza.

Los asfaltos más utilizados en el mundo hoy en día, son los derivados del petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Representan más del 90% de la producción total de asfaltos. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto y a veces en su totalidad, sin embargo existen algunos petróleos crudos, que no contienen asfalto. En base a la proporción de asfalto que poseen, los petróleos se clasifican en:

- ❖ Petróleos crudos de base asfáltica.
- ❖ Petróleos crudos de base parafínica.
- ❖ Petróleos crudos de base mixta (contiene parafina y asfalto).

El asfalto procedente de ciertos crudos ricos en parafina no es apto para fines viales, por cuanto precipita a temperaturas bajas, formando una segunda fase discontinua, lo que da como resultado propiedades indeseables, tal como la pérdida de ductilidad, con los crudos asfálticos esto no sucede, dada su composición.

El petróleo crudo extraído de los pozos, es sometido a un proceso de destilación *(ver figura 2.3)*

Productos y Temperaturas típicas de destilación) en el cual se separan las fracciones livianas como la nafta y keroseno de la base asfáltica mediante la vaporización, fraccionamiento y condensación de las mismas. En consecuencia, el asfalto es obtenido como un producto residual del proceso anterior. El asfalto es además un material bituminoso pues contiene betún, el cual es un hidrocarburo soluble en bisulfuro de carbono.

El alquitrán obtenido de la destilación destructiva de un carbón graso, también contiene betún, por lo tanto también es un material bituminoso pero no debe confundirse con el asfalto, ya que sus propiedades difieren considerablemente.

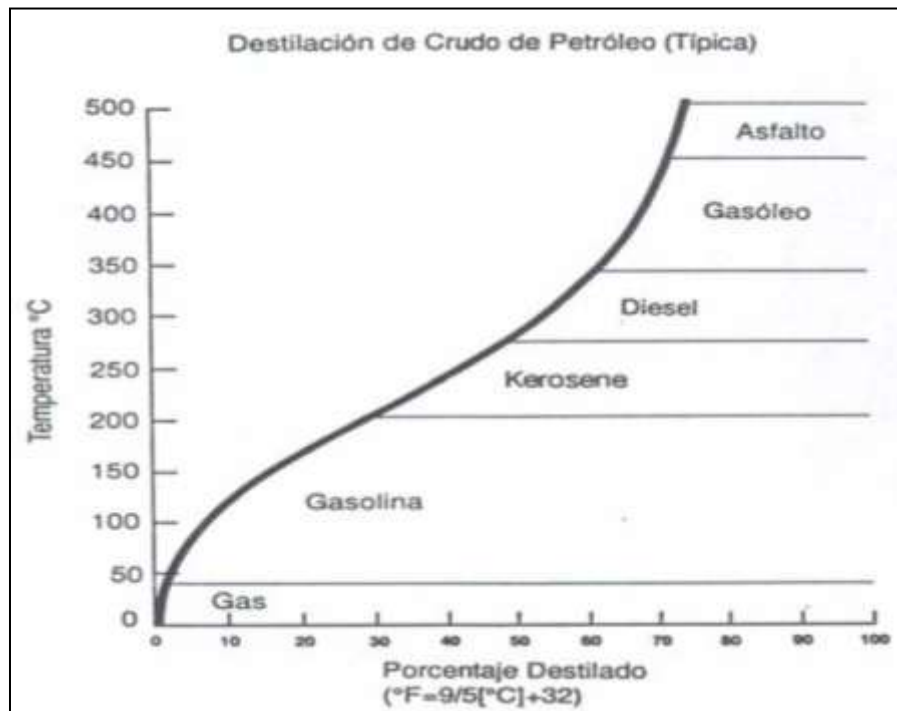


Figura. 2.3 Productos y Temperaturas típicas de destilación.¹²
Fuente: (Maxil Coyopotl, Roberto; Salinas Hernández, Marco Antonio, 2006)

El asfalto de petróleo moderno, tiene las mismas características de durabilidad que el asfalto natural, pero tiene la importante ventaja adicional de ser refinado hasta una condición uniforme, libre de materias orgánicas y minerales extraños.

2.3.3 COMPOSICIÓN DEL ASFALTO.

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos, en el cual es difícil establecer una distinción clara entre fase continua y dispersa. Las primeras experiencias para descubrir su estructura, fueron desarrolladas por Nellensteyn en 1924, cuyo modelo fue mejorado más tarde por Pfeiffery Saal en 1940, en base a limitados procedimientos analíticos. (*e-asfalto*, 2010, págs. 15-18)

¹² Ventajas y Desventajas del Uso de Polímeros en el Asfalto, Maxil Coyopotl, Roberto.

El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, el cual provee de una razonable explicación de dicha estructura, en el cual existen dos fases; una discontinua (aromática) formada por dos asfáltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfáltenos, denominada maltenos. Las resinas contenidas en los maltenos son intermediarias en el asfalto, cumpliendo la misión de homogeneizar y compatibilizar a los insolubles asfáltenos. Los maltenos y asfáltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites.

2.3.4 OBTENCIÓN DEL ASFALTO EN REFINERÍAS.

El crudo de petróleo es una mezcla de distintos hidrocarburos que incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos, los componentes del asfalto. Para obtener este debe separarse entonces las distintas fracciones del crudo de petróleo por destilaciones que se realizan en las refinerías de petróleo. (*Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile, 2001, págs. 45-66*)

2.3.4.1 DESTILACIÓN PRIMARIA.

Es la operación a que se somete el crudo. Consiste en calentar el crudo en hornos tubulares hasta aproximadamente 375° C. Los componentes livianos (nafta, kerosene, gas oil), hierven hasta esta temperatura y se transforman en vapor. La mezcla de vapores y líquido caliente pasa a una columna fraccionada. El líquido o residuo de destilación primaria se junta todo en el fondo de la columna y de ahí se bombea a otras unidades de la refinería.

2.3.4.2 DESTILACIÓN AL VACÍO.

Para separar el fondo de la destilación primaria, otra fracción libre de asfáltenos y la otra con el concentrado de ellos, se recurre comúnmente a la destilación al vacío. Difiere de la destilación primaria, en que mediante equipos especiales se baja la presión (aumenta el vacío) en la columna fraccionada, lográndose así que las fracciones pesadas hiervan a menor temperatura que aquella a la que hervían a la presión atmosférica. El producto del fondo de la columna, es un residuo asfáltico más o menos duro a temperatura ambiente, se denomina residuo de vacío. De acuerdo a la cantidad de vacío que se practica en la columna de destilación, se obtendrán distintos cortes de asfaltos que ya pueden ser utilizados como cementos asfálticos.

2.3.4.3 DESASFALTIZACIÓN CON PROPANO O BUTANO.

El residuo del vacío obtenido, contiene los asfáltenos dispersos en un aceite muy pesado, que, a la baja presión (alto vacío) y alta temperatura de la columna de vacío, no hierve (se destila). Una forma de separar el aceite de los asfáltenos es disolver (extraer) este aceite en gas licuado de petróleo. El proceso se denomina “desasfaltización” y el aceite muy pesado obtenido, aceite desasfaltizado. Se utiliza como solvente propano o butano líquido, a presión alta y temperaturas relativamente moderadas (70°C a 120 ° C). El gas licuado extrae el aceite y que da un residuo semisólido llamado “bitumen”. En la figura 2.4 se muestra en forma esquemática el proceso de refinación del petróleo:

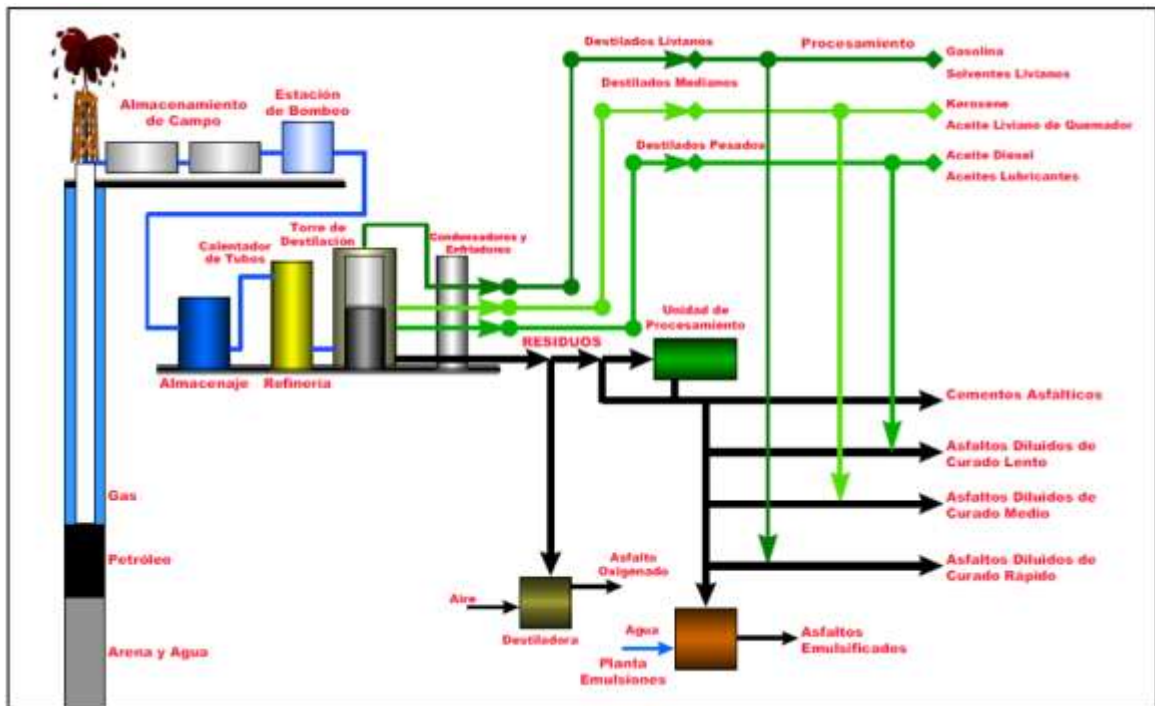


Figura 2.4 Proceso de refinación del petróleo.

Fuente: (Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile, 2001)

2.3.5 CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO.

El asfalto es un líquido viscoso constituido esencialmente por hidrocarburos o sus derivados, a continuación enlistamos algunas de sus características:

- ❖ Consistencia: Se refiere a la dureza del material, la cual depende de la temperatura. A altas temperaturas se considera el concepto de viscosidad para definirla.
- ❖ Durabilidad: Capacidad para mantener sus propiedades con el paso del tiempo y la acción de agentes envejecedores.
- ❖ Susceptibilidad Térmica: Variación de sus propiedades con la temperatura.
- ❖ Pureza: Definición de su composición química y el contenido de impurezas que posee.
- ❖ Seguridad: Capacidad de manejar el asfalto a altas temperaturas sin peligros de inflamación.

2.3.6 PROCESOS DEL ASFALTO.

El asfalto cuenta con tres tipos de procesos de mejoramiento, tanto físicos como químicos, descritos a continuación (Maxil Coyopotl, Roberto; Salinas Hernández, Marco Antonio, 2006, págs. 37-40):

Proceso Químico:

- Polimeración: Formación de moléculas más grandes, generando una estructura más rígida. Depende del tipo de asfalto y la temperatura. Proceso irreversible pero se puede atenuar.
- Oxidación: Es una reacción entre el asfalto y el oxígeno, es una forma de polimeración.
- *Proceso Físico – Químico:*
- Volatilización: Evaporización de los componentes más livianos del asfalto.
- Depende únicamente de la temperatura, proceso reversible pero no se logra el mismo material.

Proceso Físico:

- Endurecimiento térmico (reversible).
- Endurecimiento en la vecindad del agregado (no reversible).

2.3.7 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ASFALTOS.¹³

Las propiedades físicas de los asfaltos son resultado de ensayos empíricos o semi-empíricos, en las cuales se plantea determinar sus características reológicas. (Maxil Coyopotl, Roberto; Salinas Hernández, Marco Antonio, 2006, págs. 42-50)

2.3.7.1 DENSIDAD.

En los asfaltos que se utilizan en la construcción de pavimentos esta cualidad varía desde 0.9 – 1.4 Kg. /m³ Los valores más altos de densidad de un asfalto corresponden a los asfaltos procedentes de crudos con un alto contenido de hidrocarburos aromáticos. La medida de la densidad sirve de control de la uniformidad de un suministro. La densidad relativa de un asfalto es la razón entre el peso de un determinado volumen de asfalto y el peso de un volumen igual de agua a una determinada temperatura, por ejemplo veinte y cinco grados centígrados. El conocimiento de esta propiedad permite convertir de pesos a volúmenes y viceversa, esta se determina con un picnómetro. Los asfaltos poseen una densidad relativa a 25 °C del orden de 1.03.

2.3.7.2 PENETRACIÓN.

La penetración es una medida de la consistencia del asfalto, que se determina midiendo en décimas de milímetro, la longitud de una aguja normalizada que entra en una muestra en unas condiciones especificadas de tiempo, temperatura y carga. Esta cualidad, por si sola, no permite identificar un asfalto, pero sí define si el producto que está sometido al ensayo es líquido, semilíquido, semisólido o sólido. La penetración de un producto asfáltico disminuye cuando la densidad del mismo aumenta.

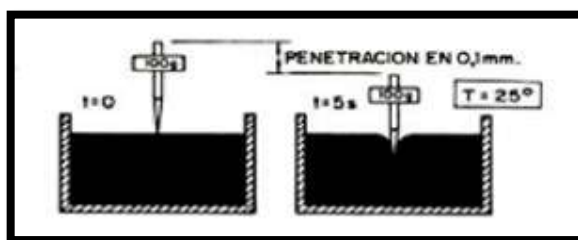


Figura 2.5 Ensayo de penetración.

¹³Ventajas y Desventajas del Uso de Polímeros en el Asfalto (Maxil Coyopotl, Roberto; Salinas Hernández, Marco Antonio, 2006)

2.3.7.3 VISCOSIDAD.

La viscosidad es la relación entre la fuerza aplicada a un fluido y la velocidad con la que fluye. Por lo tanto la viscosidad de un asfalto es una de sus características esenciales desde el punto de vista de su comportamiento en el momento de su aplicación cuando su consistencia es suficientemente reducida. La viscosidad depende de la temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una idea de cuál es su susceptibilidad térmica.

Solo para ciertas investigaciones se utilizan viscosímetros capilares para la obtención de la viscosidad absoluta del producto a una temperatura. En la práctica se suele recurrir a determinar la viscosidad relativa. Los viscosímetros más utilizados son los de Saybolt (Furol y Universal). Se basan en la determinación del tiempo en que una cierta cantidad de producto asfáltico a una temperatura prefijada fluye por un orificio por la acción de la gravedad en unas condiciones normalizadas.

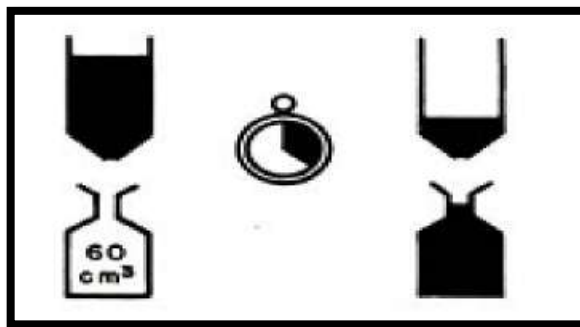


Fig. 2.6 Esquema de la determinación de la Viscosidad relativa.

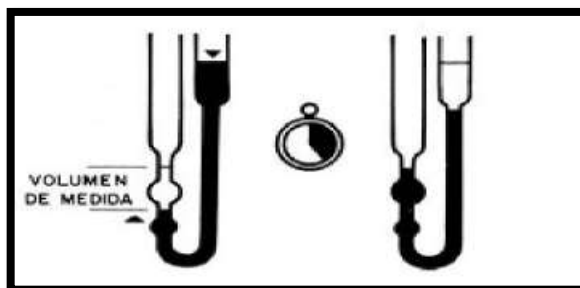


Fig. 2.7 Esquema de Viscosímetro capilar.

2.3.7.4 PUNTO DE ABLANDAMIENTO.

Para poner en obra un material asfáltico, se requiere que tenga una viscosidad baja, lo cual puede conseguirse por medio de una disolución en un solvente volátil,

por emulsión en agua o por un aumento en la temperatura, el cual este último es el procedimiento frecuentemente utilizado.

La susceptibilidad térmica de un producto asfáltico, es la aptitud que presenta para variar su viscosidad en función de la temperatura. Es muy importante la susceptibilidad debido a que se puede conocer la temperatura adecuada para que el producto asfáltico adquiera la viscosidad requerida para el uso que se le dé.

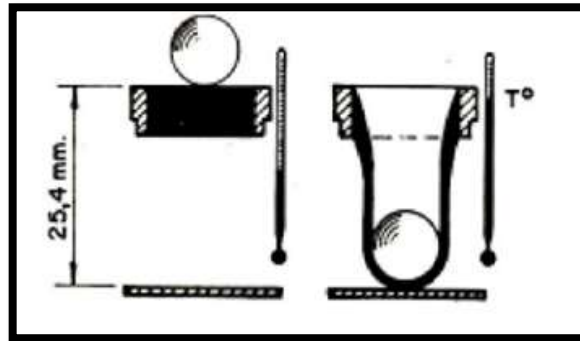


Fig. 2.8 Diagrama de ensayo de punto de ablandamiento (anillo y bola).

2.3.7.5 DUCTILIDAD.

La ductilidad se mide por alargamiento, antes de producirse la rotura de una probeta de material asfáltico estirada por sus extremos con una velocidad constante.

Los materiales asfálticos están sometidos frecuentemente a variaciones de temperatura que le provocan cambios dimensionales, para esto es necesario que el material asfáltico sea suficientemente dúctil para alargarse sin producir grietas, pero una ductilidad excesiva es riesgosa debido a que se pueden presentar ondulaciones por efectos de las cargas de tráfico.

Puede comprobarse experimentalmente que para un mismo material, la ductilidad crece cuando crece la temperatura, y para materiales distintos, pero del mismo tipo, la ductilidad aumenta cuando la penetración aumenta o cuando la viscosidad disminuye.

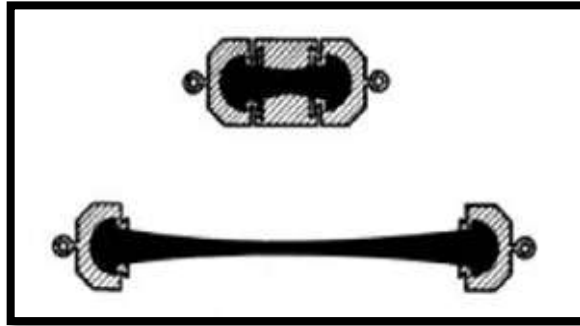


Fig. 2.9 Diagrama del ensayo de ductilidad.

2.3.7.6 PUNTO DE INFLAMACIÓN.

Es la temperatura a la cual arden los vapores del asfalto al aproximar la superficie del material bituminoso a una llama de prueba. Su determinación es útil para el manejo en obra del asfalto para implementar precauciones, especialmente si su punto de inflamación es cercano a la temperatura de manejo en obra. El punto de inflamación de un asfalto debe estar alrededor de los 215 °C. Este ensayo se lleva a cabo en un equipo normalizado llamado copa Cleveland.

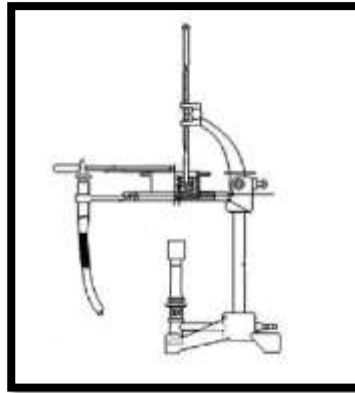


Fig. 2.10 Esquema de la copa Cleveland.

2.3.7.7 VOLATILIDAD.

Indica la cantidad de aceites volátiles que contiene un asfalto, mediante calentamiento a una temperatura determinada durante un cierto tiempo. Esta

propiedad da un índice de inalterabilidad del asfalto durante las operaciones previas a su puesta en obra.

2.3.7.8 SOLUBILIDAD.

Por definición, un asfalto es totalmente soluble en sulfuro de carbono. Si al realizar el ensayo de un material quedara un residuo insoluble, el resultado del ensayo permitiría juzgar sobre la cantidad de asfalto puro que contiene dicho material. Por otro lado, la propiedad de solubilidad, sirve para comprobar la uniformidad de composición de un producto de este tipo y para determinar la cantidad de asfalto de que consta un pavimento.

2.3.7.9 ADHERENCIA.

Es la resistencia que presenta un producto asfáltico al intentar despejarlo de un agregado pétreo, pero esta adherencia no puede tener lugar más que si el agregado mineral es mojado por el asfalto. Además de esto, tiene que existir afinidad entre las moléculas de uno y otro cuerpo.

2.3.7.10 ENVEJECIMIENTO.

El asfalto está compuesto por moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del aire oxidándose lo que les hace más duros y frágiles. Se debe tener en cuenta que gran parte del envejecimiento o endurecimiento oxidativo tiene lugar antes de que el asfalto esté compactado, durante el proceso de mezcla en el que el ligante está sometido a altas temperaturas y en forma de película fina, lo que hace que el proceso sea más rápido, pudiéndose producir en este periodo otros tipos de envejecimiento, como la pérdida de los componentes más volátiles del asfalto, que se traduce en un endurecimiento del mismo. Por lo cual si se desea comparar las propiedades del asfalto con su comportamiento en la mezcla, se debe estudiar el asfalto en el estado de envejecimiento en que va a estar el material cuando esté en uso, y por lo tanto habrá que someterlo a un envejecimiento artificial acelerado antes de estudiar alguna de sus propiedades.

2.3.7.11 COMPORTAMIENTO MECÁNICO.

Las características mecánicas y funcionales de un asfalto son decisivas para el comportamiento de la mezcla asfáltica tendrá al momento de entrar en servicio, por esta razón se presta una mayor atención a la característica mecánica y

resistente de los asfaltos, en especial a su deformación a baja carga (reología¹⁴), su poder aglomerante y su comportamiento y resistencia a la rotura.

2.3.7.12 COMPORTAMIENTO REOLÓGICO.

La reología estudia la respuesta mecánica de un material, cuyas propiedades varían en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de una carga, excluyéndose los fenómenos de rotura. Los asfaltos son materiales visco-elásticos que presentan un comportamiento reológico muy complejo. La respuesta de un asfalto frente a una sollicitación, depende de la temperatura, de la magnitud y el tiempo de aplicación de la carga.

El comportamiento visco-elástico se puede caracterizar por al menos dos propiedades: la resistencia total a la deformación (G^* llamado módulo complejo) y la distribución relativa en esa resistencia, entre la parte viscosa y la parte elástica (llamado ángulo de fase).

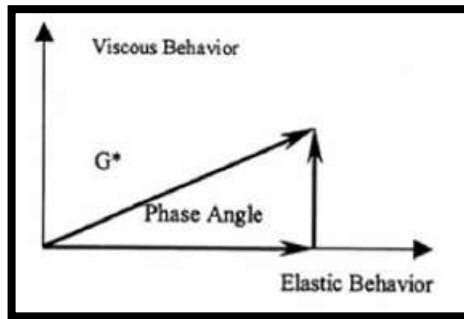


Figura 2.11. Rigidez del ligante asfáltico y ángulo de fase

La forma experimental más extendida de caracterizar este comportamiento es a través de ensayos dinámicos de oscilación, en los que se mide un Módulo complejo G^* que representa la relación entre la tensión aplicada y la deformación experimentada por el material y un ángulo de fase δ , que es la diferencia de fase entre la tensión y la deformación, y que da una idea sobre la distribución de las dos componentes, elástica y viscosa del material.

A bajas temperaturas y altas frecuencias los asfaltos tienden a un G^* límite próximo a 1.0 GPa. Y a un $\delta=0$ grados. Este valor de G^* refleja la rigidez de los enlaces carbono-hidrógeno al alcanzar los ligantes su volumen mínimo. Al aumentar la temperatura o disminuir la frecuencia, G^* disminuye de forma continua

¹⁴ Es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir.

y aumenta δ . La forma en que cambien será función de la composición del ligante, lo harán de forma muy rápida y otros de forma lenta.

A continuación se presentan diferentes intervalos de temperatura relacionados con las propiedades reológicas de un ligante asfáltico incluyendo también el posible deterioro del pavimento que puede originarse. **(Bocaz, Cristián Salgado, 2008, págs. 21-28)**

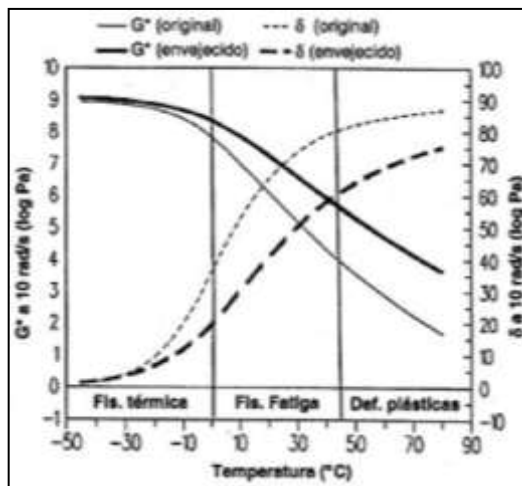


Figura. 2.12 Propiedades del ligante asfáltico en función de la temperatura.

2.3.8 PROPIEDADES QUÍMICAS DE LOS ASFALTOS.

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: *asfaltenos* y *máltenos* (ver Figura 2.13). **(Cortez. Jose Mauricio, 2002, págs. 55-68)**

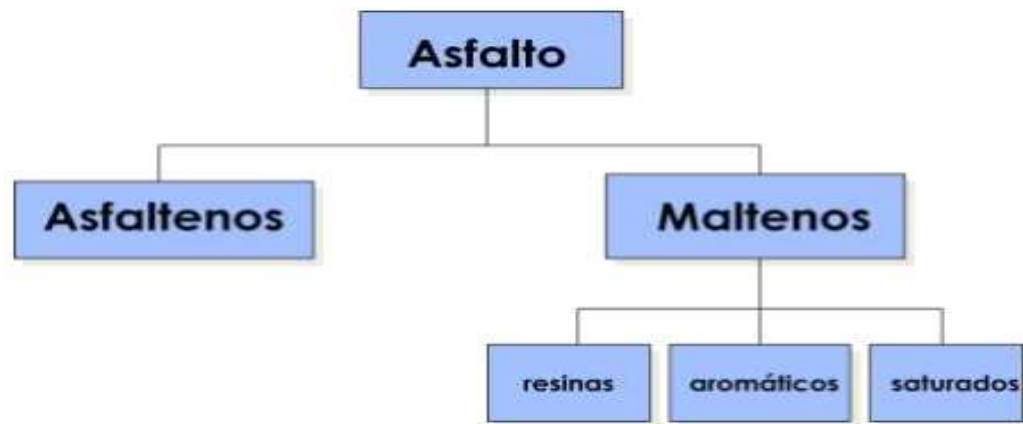


Figura 2.13 Composición del asfalto.¹⁵

a) Los asfaltenos, son compuestos químicos orgánicos y representan los compuestos más pesados y por tanto de mayor punto de ebullición. 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 y se encuentran disueltos en los máltenos, es decir es la fase discontinua del asfalto.

b) Los máltenos, son líquidos viscosos formando la fase continua del asfalto. Su contenido se asocia a las propiedades mecánicas mostradas por el asfalto. Generalmente, existe mayor proporción de máltenos que de asfaltenos en los asfaltos. El mayor contenido de máltenos y su naturaleza química son las que le dan la calidad a un asfalto. Los máltenos se subdividen en:

- Resinas: moléculas intermediarias en el asfalto, proporcionan las cualidades adhesivas (pegajosidad) en el asfalto. Son sólidos o semisólidos de color negro.
- Aromáticos: son líquidos viscosos de color negruzco e influye en la facilidad que tiene un asfalto para “admitir” polímeros modificadores. Los aromáticos constituyen de un 40% al 65% el total del asfalto.

¹⁵ Tesis “Guía básica de diseño, control de producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente” José Mauricio Cortez, Hugo Wilfredo Guzmán, Amílcar Daniel Reyes.

- Saturados: son aceites viscosos de coloración amarillenta, en el cual flotan como islas los máltenos y asfáltenos.

Describiendo la estructura del coloide, las resinas circundan en forma inmediata a los asfáltenos y los aceites rodean a ese compuesto (ver figura 2.14).



Figura 2.14 Estructura coloidal del asfalto.¹⁶

La proporción de asfáltenos y máltenos en el asfalto puede variar debido a un sin número de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla del pavimento, y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado.

2.4 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

¹⁶ Seminario “Mezclas Asfálticas en Caliente” impartida por el Instituto Salvadoreño del Asfalto en Agosto de 2009.

sistemas tradicionalmente utilizados para la clasificación de los asfaltos corresponden a:

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

Sin embargo, desde hace algunos años, se introdujo un nuevo sistema de clasificación de cementos asfálticos, basado en el desempeño de los mismos, dentro del marco de la metodología de diseño SUPERPAVE (SUperior PERforming asphalt PAVEments).

2.4.1 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)¹⁷, 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 pavimentación¹⁸, 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 al 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 2.3, se presentan las características físicas que deben cumplir los cementos asfálticos, para ser clasificados de acuerdo a la norma ASTM D 946.

¹⁷ The Handbook of Highway Engineering, T.F. Fwa

¹⁸ History of ASTM Committee D04 on Road and Paving Material, 1903-2003 de Prithvi S. Kandhal.

Ensayo	Norma de ensayo ASTM	Clasificación por Penetración (Grados de Penetración)									
		40 - 50		60 - 70		85 - 100		120-150		200-300	
		Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Penetración (0.1mm)	D 5	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Flash Point (°C)	D 92	232	---	232	---	232	---	218	---	177	---
Ductilidad (cm)	D 113	100	---	100	---	100	---	100	---	100	---
Solubilidad (%)	D 2042	99.0	---	99.0	---	99.0	---	99.0	---	99.0	---
Ensayos en Residuo de asfalto, después de ensayo de Película Delgada, ASTM D 1754.											
Penetración (%)	D 5	55+	---	52+	---	47+	---	42+	---	37+	---
Ductilidad (cm)	D 113	---	---	50	---	75	---	100	---	100	---

Tabla 2.3. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 946-82 (Re aprobada 2005)

Tal como se ha indicado anteriormente, el desempeño del asfalto dependerá entre otros aspectos de la temperatura a la que éste se exponga y a su composición. Al respecto, se ha observado que algunos asfaltos, no obstante a que corresponden a un mismo tipo de clasificación por penetración, presentan consistencias o viscosidades diferentes a una misma temperatura. Lo anterior, constituye una de las limitantes de dicho sistema de clasificación de asfaltos. En la gráfica que se presenta en la Figura 2.15, se visualiza con mayor facilidad este comportamiento.

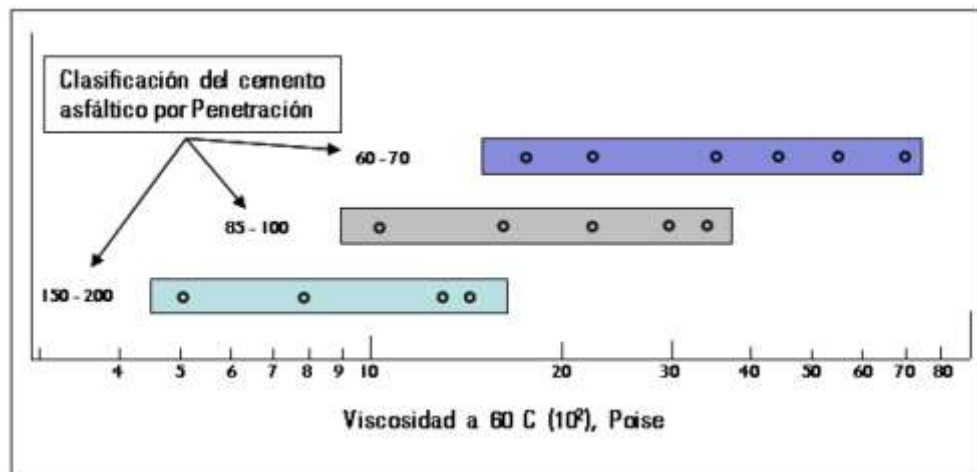


Fig. 2.15 Resultados de ensayos de viscosidad a 60°C, realizados en asfaltos clasificados por penetración. Cada punto al interior de los recuadros constituye un suministrante de asfalto. Fuente: Adaptado de Asphalt Cement Consistency Study, Fiel Evaluation of Viscosity- and Penetration-Graded Asphalt Cements, Final Report, Louisiana.

2.4.2 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD.

El sistema de clasificación por viscosidad fue introducido a principios de la década de 1960¹⁹, 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, una de las cuales está relacionada con 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. No obstante lo anterior, es importante aclarar que el Sistema de Clasificación por Viscosidad también posee limitantes, las cuales se abordarán con mayor detalle adelante.

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 a) Viscosidad (AC) y b) 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. A continuación, en la Tabla 2.4, se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos.

Ensayo	Norma de ensayo ASTM	Clasificación por Viscosidad (Grados basados en asfalto original)									
		AC - 5		AC - 10		AC - 20		AC - 30		AC - 40	
		Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Viscosidad Absoluta (Poise)	D 2171	400	600	800	1200	1600	2400	2400	3600	3200	4800
Viscosidad Cinemática (cSt)	D 2170	175	---	250	---	300	---	350	---	400	---
Penetración (0.1 mm)	D 5	140	---	80	---	60	---	50	---	40	---
Flash Point (°C)	D 92	177	---	219	---	232	---	232	---	232	---
Solubilidad (%)	D 2042	99.0	---	99.0	---	99.0	---	99.0	---	99.0	---
Ensayos en residuo de asfalto, después de ensayo de Película Delgada, ASTM D 1754											
Viscosidad Absoluta (Poise)	D 2171	2,500	---	5,000	---	10,000	---	15,000	---	20,000	---
Ductilidad	D 113	100	---	75	---	50	---	40	---	25	---

Tabla 2.4. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381²⁰

¹⁹ The Future of California's Asphalt Binder Specifications, <http://www.graniterock.com/>.

²⁰ ASTM D 3381, Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction

b) 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 2.5, se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos.

Ensayo	Norma de ensayo ASTM	Clasificación en Residuo Asfáltico (Grados basados en residuo asfáltico)									
		AR - 1000		AR - 2000		AR - 4000		AR - 8000		AR - 16000	
		Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Viscosidad Absoluta (Poise)	D 2171	750	1250	1500	2500	3000	5000	6000	10000	12000	20000
Viscosidad Cinemática (cSt)	D 2170	140	---	200	---	275	---	400	---	550	---
Penetración (0.1 mm)	D 5	65	---	40	---	25	---	20	---	20	---
% de penetración original		---		40		45		50		52	
Ductilidad		100		100		75		75		75	
Pruebas sobre el asfalto original											
Flash Point (°C)	D 92	205	---	219	---	227	---	232	---	238	---
Solubilidad (%)	D 2042	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	

Tabla 2.5. Requisitos para clasificar el asfalto según especificación ASTM D 3381²¹

A continuación, en la Figura 2.16 se presenta de manera general una comparación entre los tipos de asfalto de acuerdo al sistema de clasificación por penetración (PEN) y al sistema de clasificación por viscosidad (AC y AR). Al respecto, es importante tener en cuenta que la información contenida en la Figura 2.16, no debe considerarse como una equivalencia entre los sistemas de clasificación de cementos asfálticos, ya que pueden ocurrir diferencias considerables entre éstos, debido a la variabilidad de comportamientos del asfalto dependiendo del origen del crudo y del proceso de producción del cementante.

²¹ ASTM D 3381, Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction.

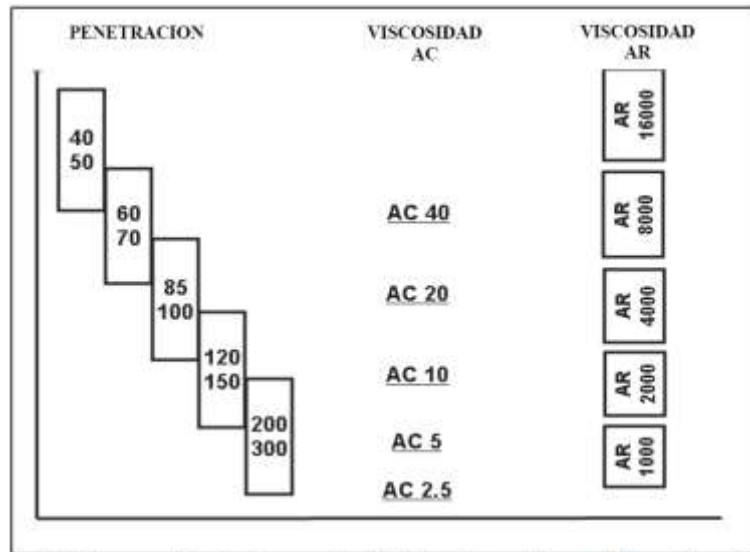


Figura 2.16 Comparación de sistemas de clasificación por Penetración y Viscosidad.
Fuente: Adaptado del documento PERFORMANCE GRADED (PG) ASPHALTS IN CALIFORNIA del Institute of Transportation Studies de la University of California Berkeley

Tal como se indicó anteriormente, no obstante a que el Sistema de Clasificación de asfaltos por Viscosidad brinda información importante sobre el comportamiento del asfalto, este posee limitantes al igual que el Sistema de Clasificación basado en penetración, en donde asfaltos con una misma clasificación poseen comportamientos diferentes a una misma temperatura. Lo anterior, puede visualizarse de manera más clara en la Figura 2.17.

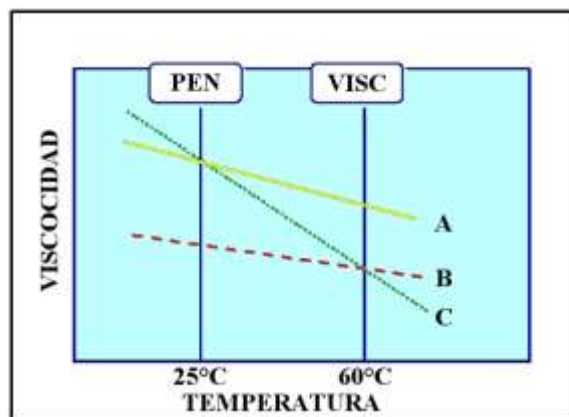


Figura 2.17 Comparación de sistemas de clasificación de asfaltos
Fuente: Adaptado de Superpave Binder Specification Workshop, Federal Highway Administration.

2.4.3 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN POR DESEMPEÑO.

El Sistema de Clasificación por Desempeño, forma parte del Sistema SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement), el cual es producto del programa de investigación Strategic Highway Research Program (SHRP), desarrollado en los Estados Unidos por la U.S. Transportation Research Board (TRB) y la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) entre 1987 y 1993, para mejorar el desempeño y durabilidad de las vías en Estados Unidos. En general, el sistema SUPERPAVE, incluye especificaciones para asfalto y agregado, un nuevo método de diseño de mezclas asfálticas en caliente y un modelo de predicción del comportamiento de pavimentos asfálticos.

La particularidad de este Sistema, es que los ensayos son desarrollados a temperaturas y condiciones más representativas a las que experimentan las carreteras en servicio²². Los ensayos requeridos para la clasificación del asfalto, están contemplados en la norma ASTM D 6373, Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder, estos asfaltos son más conocidos como asfaltos clasificados por grado de desempeño. Los cementos asfálticos por desempeño, son seleccionados basados en el clima en el cual el pavimento estará en servicio, en el cual se especifica la temperatura mínima y máxima en el cual el asfalto presente un adecuado desempeño. Por ejemplo, un asfalto clasificado por desempeño como PG 64-22, corresponde a un asfalto que satisface los requerimientos de las propiedades físicas a bajas temperaturas hasta una temperatura mínima de -22°C y una temperatura máxima de 64°C; en los casos donde la variación entre la temperatura máxima y mínima es mas de 90°C, generalmente se recomienda la utilización de aditivos modificadores del cemento asfáltico, para satisfacer los requerimientos de desempeño.

A continuación, en la Tabla 2.6, se presentan las características físicas que deben cumplir los cementos asfálticos, para ser clasificados de acuerdo a la norma ASTM D 6373.

²² Superpave Fundamentals, NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE

Grado de desempeño	PG 58 -				PG 64 -					PG 70 -					PG 76 -				
	16	22	28	34	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Temperatura máxima de diseño (Promedio 7 días)	< 58				< 64					< 70					< 76				
Temperatura mínima de diseño	> 16	> 22	> 28	> 34	> 10	> 16	> 22	> 28	> 34	> 10	> 16	> 22	> 28	> 34	> 10	> 16	> 22	> 28	> 34
ASFALTO ORIGINAL																			
Punto de inflamación, °C	230																		
Reómetro de corte dinámico G°/send, min 1.00 kPa @ 10 rad/seg Temperatura de ensayo °C	135																		
RESIDUO RTFOT																			
Pérdida de masa, % máx.	1.00																		
Reómetro de corte dinámico G°/send, min 2.20 kPa @ 10 rad/seg Temperatura de ensayo °C	58				64					70					76				
RESIDUO PAV																			
Temp. de envejecimiento PAV, °C	100				100					100 (110)					100 (110)				
Reómetro de corte dinámico G°/send, máx 5000 kPa @ 10 rad/seg	25	22	19	16	31	28	25	22	19	34	31	28	25	22	37	34	31	28	25
Temperatura de ensayo °C																			
Endurecimiento físico	INFORME																		
Viga geométrica de flexión S, máx 300 Mpa valor-m, min. 0.300 Temperatura de ensayo, °C	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Ensayo de tracción directa Deformación de falla, min. 1.0% Temperatura de ensayo, °C	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

*Tabla 2.6. Requisitos para clasificar el asfalto por desempeño,
Según ASTM D 6373, Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder.*

2.5 DEFINICION DE MEZCLA ASFALTICA.

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 transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráficos pesados intensos.

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. *(Rodriguez, Alejandro Padilla, 2000, págs. 45-46).*

2.5.1 COMPORTAMIENTO DEL LIGANTE ASFALTICO.

El ligante asfáltico es un material muy apto para la obra civil y con características manejables para diferentes situaciones, su característica principal es su maleabilidad en contacto con diferentes temperaturas, esta característica la sensibilidad térmica es su virtud y su debilidad. Por esta razón, casi todos los ensayos de caracterización de cementos asfálticos y mezclas asfálticas deben especificar las temperaturas de trabajo. Sin estos datos no se puede interpretar el ensayo. El comportamiento del cemento asfáltico depende también del tiempo de aplicación de la carga.

El cemento asfáltico es a veces llamado material visco-elástico porque exhibe simultáneamente características viscosas y elásticas. A altas temperaturas el cemento asfáltico actúa casi como un fluido viscoso. En otras palabras calentado a temperaturas elevadas (por ejemplo: $>100^{\circ}$ C), muestra la consistencia de un lubricante utilizado como aceite para motores. A muy baja temperatura (por ejemplo $< 100^{\circ}$ C), el cemento asfáltico se comporta casi como un sólido elástico. Es decir, actúa como una banda de goma. Cuando es cargado se estira o

comprime adoptando diferentes formas. Cuando es descargado, retoma fácilmente su forma original.

Al reaccionar con el Oxígeno, la estructura del asfalto se hace más dura y frágil y da origen al término “endurecimiento por oxidación” o “endurecimiento por envejecimiento”. (*Asfalto., 1973, págs. 28-30*)

2.5.2 COMPORTAMIENTO DEL AGREGADO MINERAL.

Los materiales pétreos empleados para la elaboración de concreto asfáltico pueden o no tener algún tipo de tratamiento previo a su utilización. La aplicación de tratamientos al agregado mineral, tienen como objeto mejorar ciertas características de la mezcla asfáltica; estos tratamientos pueden ser el lavado del agregado, el cribado o la trituración parcial o total.

Independientemente de la fuente (métodos de procesamiento u origen mineralógico) se espera que el agregado provea un resistente y durable esqueleto pétreo para tolerar las repetidas aplicaciones de carga. Agregados de textura rugosa, de buena cubicidad, dan más resistencia que los redondeados.

Aunque una pieza de agregado redondeado podría poseer la misma resistencia interna de una pieza angular, las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una fuerte trabazón de las partículas, a diferencia de lo que ocurre con las partículas redondeadas, ya que tienden a deslizarse unas sobre otras.

Cuando una masa de agregados es cargada puede generarse dentro de la masa un plano por el que las partículas sean deslizadas o cizalladas unas respecto a otras, lo cual resulta en una deformación permanente de la masa. Es en este plano donde las tensiones de corte exceden a la resistencia al corte de la masa de agregados. La resistencia al corte del agregado pétreo es de crítica importancia en el desempeño de una carpeta asfáltica, ya que provee en gran medida la resistencia a la deformación permanente de la mezcla.

Comportamiento del agregado a la carga de corte.

Plano de corte Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas.

El comportamiento a la resistencia al corte de los agregados con superficies fracturadas y de los agregados lisos se puede observar fácilmente en las pilas de acopio, en cuales los agregados triturados forman pilas más empinadas y

estables que los redondeados. Los ángulos de reposo son mayores en los materiales con caras fracturadas.

De acuerdo con la teoría de Mohr-Coulomb, la resistencia al corte de una mezcla de agregados depende de “cuán unidas estén las partículas del agregado” (el término usual es cohesión), la tensión normal a que están sometidos los agregados, y la fricción interna de los agregados.

Una masa de agregados tiene relativamente baja cohesión. Así, la resistencia al corte depende principalmente de la oposición al movimiento que ofrecen los agregados. Además, cuando es cargada, la masa de agregados tiende a ser más fuerte porque la tensión resultante tiende a unir a los agregados más estrechamente entre sí, lo que ocasiona que la resistencia al corte en la masa de agregados aumente.

El ángulo de fricción interna indica la capacidad del agregado para entrelazarse y así crear una masa de agregados casi tan fuerte como las partículas individuales.

Para asegurar una mezcla de materiales resistente a emplear en la elaboración de un concreto asfáltico, se deben especificar propiedades del agregado que mejoren la fricción interna de la mezcla de agregados; esto se logra normalmente recurriendo a porcentajes de caras fracturadas en el material grueso que integra la mezcla.

2.5.3 COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Siendo las propiedades individuales de los componentes de la HMA²³ importantes, el comportamiento de la mezcla asfáltica se explica mejor considerando que el cemento asfáltico y el agregado mineral actúan como un sistema. Un camino para entender mejor el comportamiento de las mezclas asfálticas es considerar los tipos básicos de deterioros que el ingeniero trata de evitar: la deformación permanente, la fisuración por fatiga y fisuración por baja temperatura.

Deformación permanente.

La deformación permanente es el deterioro caracterizado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. Se llama deformación “permanente” pues representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga. Esta deformación es irrecuperable. Si bien el ahuellamiento puede tener varias causas (por ejemplo

²³ Hoja de mezcla asfáltica u hoja de pavimento asfáltico.

debilidad de la HMA por daño de la humedad, abrasión, densificación del tránsito). Causado usualmente por varias aplicaciones de carga consecutivas.

Fisuración por fatiga.

Como el ahuellamiento, la fisuración por fatiga es un tipo de deterioro que con mucha frecuencia se produce en la huella donde las cargas pesadas son aplicadas. Las fisuras longitudinales intermitentes a lo largo de la huella (esto es, en la dirección del tránsito) son un signo prematuro de la fisuración por fatiga. Este es un deterioro de tipo progresivo porque, en algún momento, las fisuras iniciales se unirán con otras, causando aún más fisuras. Un estado intermedio de la fisuración por fatiga es el denominado “piel de cocodrilo”, así llamado porque su forma se asemeja a la piel de un cocodrilo. En algunos casos extremos, el estado final de la fisuración por fatiga es la desintegración con la formación de baches. Un bache se forma cuando varias piezas comienzan a dislocarse y desprenderse bajo la acción del tránsito.

2.6 TIPOLOGIAS DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS.²⁴

2.6.1 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, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes. 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 volumen de agregados pétreos. (Rodríguez, Alejandro Padilla, 2000, págs. 75-80)

²⁴ CAPITULO 3 “Mezclas asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.

2.6.1.1 EVOLUCIÓN 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. Con FHWA.
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 a las grietas a baja temperatura. Con NCHRP.
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 Norte América, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente y su correcto funcionamiento. Tiene su resultado, ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiado 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.

2.6.2 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 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

2.6.3 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, una de sus funciones es que el agua lluvia caída sobre la calzada se evacue rápidamente por infiltración.

2.6.4 MICROAGLOMERADOS.

Son mezclas con un tamaño máximo de agregado pétreo limitado inferior a 10 mm, 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 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.

2.6.5 MASILLAS.

Son unas mezclas con elevadas proporciones de polvo mineral y de ligante, de manera que si hay agregado grueso, se haya disperso en la masilla formada por aquellos, este tipo de mezcla no trabaja por rozamiento interno y su resistencia se debe a la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla.

Las proporciones de asfalto son altas debido a la gran superficie específica de la materia mineral. Dada la sensibilidad a los cambios de temperatura que puede tener una estructura de este tipo, es necesario rigidizar la masilla y disminuir su susceptibilidad térmica mediante el empleo de asfaltos duros, cuidando la calidad del polvo mineral y mejorando el ligante con adiciones de fibras. Los asfaltos fundidos, son de este tipo, son mezclas de gran calidad, pero su empleo está justificado únicamente en los tableros de los puentes y en las vías urbanas, incluso en aceras, de los países con climas fríos y húmedos.

2.6.6 MEZCLAS DE ALTO MÓDULO.

Su proceso de elaboración es en caliente, citando específicamente las mezclas de alto módulo para capas de base, se fabrican con asfaltos muy duros. A veces modificados, con contenidos asfálticos próximos al 6 % de la masa de los agregados pétreos, la proporción del polvo mineral también es alta, entre el 8% - 10%. Son mezclas con un elevado módulo de elasticidad, del orden de los 13,000 Mpa a 20°C y una resistencia a la fatiga relativamente elevada. Se utilizan en

capas de espesores de entre 8 y 15 cm, tanto para rehabilitaciones como para la construcción de firmes nuevos con tráficos pesados de intensidad media o alta. Su principal ventaja frente a las bases de grava cemento es la ausencia de agrietamiento debido a la retracción o como las mezclas convencionales en gran espesor la ventaja es una mayor capacidad de absorción de tensiones y en general una mayor resistencia a la fatiga, permitiendo ahorra espesor.

2.7 TIPOS DE DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.²⁵

La durabilidad de las mezclas asfálticas es una propiedad básica de los pavimentos, deben presentar resistencia al agotamiento y a la acción del agua. La durabilidad potencial es la resistencia de la mezcla asfáltica a las combinaciones de cambios de temperatura y efectos de agua, por lo tanto, la baja durabilidad potencial de las capas del paquete asfáltico es una de las principales razones que más influyen en el deterioro y el agotamiento de las buenas condiciones de servicio de los pavimentos.

Los deterioros de los pavimentos asfálticos se deben a una serie de factores como lo pueden ser el medioambiente (lluvia, gradientes de temperatura), tráfico (cargas por eje, presión de inflado de los neumáticos, intensidad), materiales inadecuados, procesos de elaboración de las mezclas inapropiados, técnicas de construcción deficientes (transporte, extensión y compactación), fórmula de trabajo deficiente. Todos estos defectos se pueden detectar una vez que se haya concluido la obra, como por ejemplo una mala textura superficial, geometría, aspecto y también estos defectos se pueden detectar en un periodo considerable de tiempo durante la vida de servicio del pavimento, los cuales son objeto de estudios y clasificaciones cada vez más rigurosas, indican la patología en general del firme. Se mencionan a continuación los deterioros o fallos debidos solamente a formulaciones defectuosas de las mezclas asfálticas y de su puesta en obra. *(Rodríguez, Alejandro Padilla, 2000, págs. 53-64)*

2.7.1 FALLOS EN LA CONSTRUCCIÓN.

Durante la fase de construcción y puesta en obra de las mezclas asfálticas se pueden producir errores y fallos accidentales, como:

²⁵ CAPITULO 3 “Mezclas asfálticas”, Alejandro Padilla Rodríguez.

1. La segregación de la mezcla del pavimento, que a su vez se puede clasificar en los tipos siguientes:

- Segregación aleatoria.
- Segregación transversal.
- Segregación longitudinal, bien sea en el centro o en los lados.

2. Defectos en las mezclas difíciles de compactar.

Los dos tipos extremos de mala compactibilidad de las mezclas ocurren con las poco trabajables y con las blandas.

Las mezclas poco trabajables tienen un esqueleto mineral con rozamiento interno muy elevado, debido al empleo de agregados cúbicos, duros y de alta textura, así como a granulometrías determinadas y a morteros rígidos. El mayor peligro, suponiendo que su comportamiento estructural sea el previsto, radica en la necesidad de que la compactación sea enérgica y contundente sin llegar a romper las partículas minerales. Una mala densidad final reduce la durabilidad notablemente.

Las mezclas blandas se caracterizan por la dificultad de compactación al responder como un material parcialmente plástico ante las pasadas de los rodillos, con fenómeno similar al colchoneo²⁶. Pueden producirse mezclas blandas por algunos de los factores siguientes:

- Uso de agregados pétreos con partículas redondeadas o pulidas tales como la arena natural.
- Falta de la cantidad adecuada de filler mineral.
- Excesiva humedad en la mezcla.

²⁶ Fallos en el proceso de compactación generando hundimientos o concavidades en la superficie compactada.



*Figura 2.18 Fallos en la Construcción de pavimentos asfálticos.
(MEZCLAS ASFALTICAS, ALEJANDRO PADRILLA RODRIGUEZ, PAG 53)*

2.7.2 EXUDACIONES.

La exudación se caracteriza por la presencia de ligante libre o polvo mineral incorporado en la superficie del pavimento. Las superficies ricas en asfalto, especialmente en tiempo húmedo, pueden llegar a ser deslizantes si han perdido su textura. Las causas de las exudaciones son las siguientes:

- ❖ Exceso de ligante asfáltico.
- ❖ Escaso contenido de vacíos.
- ❖ Migración de los ligantes asfálticos de las capas inferiores debido a partes exudadas en las capas inferiores, dotaciones irregulares en los tratamientos de adherencia entre capas asfálticas y ligante asfáltico libre por mala adhesividad con los agregados pétreos.



*Figura 2.19 Exudaciones en pavimentos asfálticos.
(MEZCLAS ASFALTICAS, ALEJANDRO PADRILLA RODRIGUEZ, PAG 54)*

2.7.3 SEGREGACIONES.

La segregación, disgregación y peladura, es la separación de las partículas minerales de la superficie del pavimento. El agregado fino, se separa de las partículas de mayor tamaño, lo que da lugar a una apariencia de capa de pavimento erosionada y rugosa. Las causas de este defecto son las siguientes:

- ❖ Esfuerzos cortantes horizontales en la superficie de rodadura, debidos a la acción de los neumáticos de los vehículos.
- ❖ Entrada de agua en el pavimento a través de los huecos de la propia mezcla. La presión hidrostática considerable creada por las sollicitaciones del tráfico puede causar la separación de las partículas minerales de la capa superficial. Este tipo de disgregación ocurre inmediatamente después de la puesta en obra de la capa asfáltica, con malas condiciones climatológicas o compactación escasa. La extensión de la disgregación puede limitarse con el tiempo.
- ❖ Emisiones y vertidos de carburantes de los vehículos con el tiempo, de forma que los disolventes actúan contaminando los ligantes asfálticos.

Las segregaciones importantes pueden crear una dificultad al tráfico. Aparte de la incomodidad para los vehículos, estos suelen producir un incremento en el mismo deterioro. Otros factores que contribuyen a la segregación son los siguientes:

- ❖ Bajo contenido de ligante asfáltico.
- ❖ Agregados absorbentes que reducen el contenido efectivo de ligante asfáltico en la mezcla.
- ❖ Alta viscosidad del ligante asfáltico que llega a producir una mezcla frágil.
- ❖ Contaminación de ligante asfáltico como resultado de partículas de fuel que no se han quemado en la planta asfáltica.
- ❖ Sobrecalentamiento en la manipulación, que haya envejecido al ligante asfáltico.
- ❖ Mala granulometría de la mezcla con insuficiencia de finos.
- ❖ Baja compactación del material que aumenta la permeabilidad, acelera el envejecimiento del ligante asfáltico y no permite la cohesión adecuada del mismo.
- ❖ Mala calidad del mortero formado por agregado fino, polvo y ligante asfáltico, que se traduce por una escasa resistencia después de sometido a

la acción del agua. El mortero superficial puede desaparecer a causa de la abrasión.

La segregación en la superficie puede clasificarse en los tipos siguientes:

1) Segregación aleatoria, que tiene un origen más difícil de determinar. Sus causas pueden ser:

- ❖ No disponer de acopios uniformes.
- ❖ Vertidos en los dosificadores en frío.
- ❖ Error en la carga del árido en los dosificadores en frío.
- ❖ Demasiadas operaciones de arrancado y parada en las plantas de tambor secador.
- ❖ Diferencias notables de nivel en la mezcla almacenada en el silo.
- ❖ Operaciones irregulares en la descarga de los camiones.
- ❖ Demanda descompensada de la extendidora.

2) Segregación transversal, se pone de manifiesto con una peculiar mancha en la superficie. El grado de segregación se cuantifica por los cambios de textura y es fácilmente reconocible.

Esta segregación puede ser debida a:

- ❖ Empleo del material inicial que proviene del arranque de la planta.
- ❖ Inadecuadas operaciones de carga de los camiones.
- ❖ Vaciado excesivo y mal manejo de las alas de las tolvas de las extendidoras.
- ❖ Material segregado en la tolva de carga de las plantas.
- ❖ Compuertas de la mezcladora mal cerradas.
- ❖ Almacenamiento de los dosificadores primarios al límite de su capacidad.

3) Segregación longitudinal, bien sea en el centro o en los lados, se puede producir en el centro de la banda extendida o en los bordes, y puede deberse a defectos en los husillos o a una velocidad inadecuada de la extendidora.



*Figura 2.20 Segregaciones en pavimentos asfálticos.
(MEZCLAS ASFÁLTICAS, ALEJANDRO PADRILLA RODRIGUEZ, PAG 56)*

2.7.4 DESENVUELTA O DESPLAZAMIENTO DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

El desplazamiento del ligante asfáltico por el agua se puede producir al disminuir la adhesividad entre él y la superficie mineral de las partículas. El ligante es desplazado por el agua o por el vapor de agua y a veces por la combinación de algún agente que haya contaminado el pavimento. Se identifica de la forma siguiente:

- ❖ La desenvuelta por el agua puede observarse visualmente cuando afecta a las partículas del árido grueso.
- ❖ También puede afectar a la cohesión del mortero. La observación directa es difícil debiendo recurrirse a ensayos de estabilidad y resistencia al agua.
- ❖ El desplazamiento o desenvuelta por el agua, en algunos casos, comienza en la interface de dos capas asfálticas consecutivas siendo difícil de identificar visualmente en la superficie.

En escasas ocasiones el desplazamiento se acompaña de manchas exudadas del ligante en la superficie del pavimento. A veces al fenómeno anterior se añade el de la concentración de ligante en algunos puntos.

Existen diferentes causas por las que el agua puede desplazar al asfalto en su contacto con las superficies minerales del agregado:

- ❖ Agua interior o exterior al agregado pétreo: Los agregados hidrofílicos absorben agua tanto en superficie como en interior y en muchas ocasiones no se ha secado completamente en la planta asfáltica.

- ❖ Tipo de agregado pétreo: Todos los agregados pueden estar sometidos a los efectos del agua en los fenómenos de desplazamiento de ligante. Sin embargo, los agregados con altos contenidos de sílice, son más sensibles a éste fenómeno que los calizos.
- ❖ Agregados sucios: El ligante no se adhiere bien a las partículas que tienen una película de polvo. En presencia de agua, estas partículas se descubren rápidamente por lo que el polvo permite fácilmente la entrada de agua en la superficie mineral.
- ❖ Emulsificación: El ligante sometido a la acción enérgica del tráfico, puede emulsionarse especialmente con agentes químicos o minerales presentes, tales como polvo arcilloso.
- ❖ Alto contenido de vacíos: El alto contenido de vacíos de la mezcla permite el paso del agua y del vapor a través de ella. Este fenómeno puede agravarse si el drenaje de la capa es insuficiente.
- ❖ Agua libre: El agua libre existe como consecuencia de un drenaje inadecuado del pavimento. En algunos casos, especialmente en capas superiores, puede quedar atrapada el agua durante la construcción.
- ❖ Ciertas composiciones químicas de los ligantes.



*Figura 2.21 Desenvuelta o Desplazamiento de los agregados en pavimentos asfálticos.
(MEZCLAS ASFÁLTICAS, ALEJANDRO PADRILLA RODRIGUEZ, PAG 58)*

2.7.5 TEXTURA SUPERFICIAL INADECUADA.

La textura de la superficie de rodadura es una característica esencial para la seguridad de la rodadura de los vehículos. Se ha convenido es distinguir unas texturas tipo, según su profundidad media:

- 1) Micro-textura con profundidad media en círculo de arena de aproximadamente 0.4
- 2) Macro-textura con profundidad media en círculo de arena de aproximadamente 0.7
- 3) Mega-textura.
- 4) Combinación posible de las anteriores texturas.

Las causas de una textura inadecuada son las siguientes:

- ❖ Pulimento de los agregados, por ser blandos.
- ❖ Y/o granulometría con excesivos finos.
- ❖ Exceso de ligante en superficie.
- ❖ Segregaciones de la mezcla en la puesta en obra.
- ❖ Contaminaciones de la superficie.

Una mala mega-textura se debe relacionar con defectos en la extensión de la capa de mezcla o con las irregularidades reflejadas de la capa inferior.



*Figura 2.22 Textura superficial inadecuada en pavimentos asfálticos.
(MEZCLAS ASFÁLTICAS, ALEJANDRO PADRILLA RODRIGUEZ, PAG 59)*

2.7.6 AGRIETAMIENTOS Y FISURAS.

El agrietamiento y fisuración es un mecanismo habitual de fallo mecánico por fatiga de una capa de pavimento. Aparte de ello, las grietas prematuras indican un problema de diseño o de construcción de la mezcla asfáltica. Las causas son las siguientes:

- Las grietas se producen por unas tensiones mayores que la tensión de rotura de la mezcla.
- Las grietas comienzan en la zona donde la tracción por flexión es máxima y progresan bajo las cargas repetidas. Se suele formar un mapa de grietas formado por un conjunto de grietas longitudinales y transversales.
- La deformación elástica transversal se produce con las flexiones de la capa de pavimento.
- La grieta inicial comienza longitudinalmente al lado exterior de la huella de la rueda. Esta grieta es seguida por otra paralela en el borde interior de la huella.
- El uso del asfalto de alta viscosidad puede ocasionar que las mezclas sean menos resistentes al efecto acumulado de las flexiones.
- Los cambios extremos de temperaturas pueden causar en un pavimento cambios de volumen que producen grietas térmicas que, usualmente son transversales.
- La combinación de grietas longitudinales y de transversales, puede formar elementos o losas rectangulares independientes. Aunque la causa de este agrietamiento no sea debido a las cargas, una vez producido, las sollicitaciones del tráfico incrementarán severamente el deterioro al haber perdido las capas su continuidad física y resistente.
- También se producen grietas longitudinales en las juntas de trabajo. Ocurren cuando las juntas se compactan de forma insuficiente y/o a baja temperatura. Cuando crecen las grietas longitudinales, el agua penetra en el firme, deteriorándolo.
- Las grietas aleatorias por fatiga, se suelen formar por la fatiga de la mezcla asfáltica en alguna de las capas. Estas grietas están relacionadas con las sollicitaciones del tráfico. Las grietas comienzan en la parte inferior de las capas donde las tensiones son más altas, formándose una o dos grietas longitudinales próximas a las huellas de las ruedas y terminan con un estado generalizado de superficie agrietada. Normalmente la fatiga es más

acusada en la parte externa del carril con más tráfico, debido a las condiciones de borde.

- Las grietas generalizadas en las zonas de rodadura pueden ser causadas también por una inadecuada compactación, o mal diseño, de las capas inferiores que puede agravarse con la presencia de agua, más que por típico fenómeno de fatiga. En éste caso, en la capa inferior se refleja el asentamiento, deformación o agrietamiento causado por las malas prestaciones mecánicas.



*Figura 2.23 Agrietamientos y Fisuras en pavimentos asfálticos.
(MEZCLAS ASFÁLTICAS, ALEJANDRO PADRILLA RODRIGUEZ, PAG 60 y 61)*

2.7.7 BOMBEO DE FINOS.

Aunque éste es un defecto muy habitual en los pavimentos de concreto hidráulico, también puede producirse en las grietas de las capas superiores asfálticas rígidas, si el soporte tiene exceso de finos, humedad u otras contaminaciones. También se ha detectado muy frecuentemente el fenómeno en las grietas reflejadas de las bases tratadas con cemento, línea débil por la que penetra el agua, deteriorando la base.



*Figura 2.24 Bombeo de finos en pavimentos asfálticos.
(MEZCLAS ASFÁLTICAS, ALEJANDRO PADRILLA RODRIGUEZ, PAG 61)*

2.7.8 DEFORMACIONES PLÁSTICAS.

Son las variaciones permanentes del perfil superficial de la capa de mezcla asfáltica por acumulación de deformaciones permanentes y/o por desplazamiento de la masa de la misma.

Son de distintos tipos:

- 1) El arrollamiento se asocia normalmente a una baja estabilidad de las mezclas que se manifiesta en una deformación plástica perpendicular al eje de la vía.
- 2) Las roderas, que se producen transversalmente, en la huella de las ruedas de los vehículos con densificación y/o desplazamiento lateral.

Las roderas pueden describirse de la siguiente forma:

- Roderas con desplazamiento plástico, con una depresión cerca del centro de la carga aplicada y con elevaciones a cada lado de la depresión. Este tipo de rodera esta causado generalmente por insuficientes huecos en la mezcla (menos del 3%). En este caso, una
- Sobre-compactación ocasiona que el ligante rellene los huecos entre las partículas. También el betún actúa como un lubricante más que como un ligante en época estival.
- Roderas por consolidación. Son unas depresiones cerca del centro de la carga aplicada sin el acompañamiento de las elevaciones laterales. Estas roderas se producen generalmente por un exceso de huecos con falta de estabilidad de la mezcla.
- Deformación mecánica. Es el resultado de un asentamiento de las capas inferiores que puede acompañarse de grietas en las capas de pavimento.

Este fallo ocurre cuando la estructura del pavimento no está bien proyectada o construida.

El material puede también desplazarse por deslizamiento de las capas inferiores debido a presiones horizontales. Este desplazamiento está causado algunas veces por suciedad, contaminaciones o excesiva cantidad de ligante en el tratamiento de adherencia de la superficie inferior. El desplazamiento puede ocurrir en la unión de un pavimento rígido y un pavimento asfáltico tal como sucede en algunas losas de aproximación de los puentes. Este desplazamiento ocurre frecuentemente en las zonas de las intersecciones donde las fuerzas horizontales de los vehículos son más elevadas.

Las causas de las deformaciones plásticas son las siguientes:

- Contenido inadecuado de vacíos en las mezclas convencionales (menos del 3%).
- Excesivo contenido de vacíos (mayor del 8%) en estas mismas mezclas.
- Baja viscosidad de los ligantes asfálticos.
- Errores en el proyecto de la mezcla, ya que las propiedades del ligantes no son las mismas a la temperatura de los ensayos que a la temperatura del servicio en obra. En definitiva se dispone de un ligante más blando que él que estaba previsto.
- Contaminación del ligante asfáltico con partículas de fuel²⁷ no quemado.
- Insuficiente estabilidad del material todavía caliente cuando se ha permitido el paso anticipado del tráfico.
- Excesiva consolidación bajo tráfico de las capas del firme.
- Tiempo de aplicación de la carga más prologado que el previsto las mezclas bituminosas tienen respuestas más elásticas a las cargas de corta duración y menos elásticas a las cargas lentas. Por ésta razón, las deformaciones plásticas se presentan sobre todo en las rampas y en otras zonas de tráfico lento.
- Factores del proyecto de la mezcla tales como un contenido de arena natural, un bajo contenido de filler²⁸, y la existencia de partículas minerales redondeadas.

²⁷ Fracción de Petróleo que se obtiene como residuo de la destilación.

²⁸ Es un mineral compuesto básicamente por carbonato, cuya función es la de mejorar la distribución granulométrica.

- Insuficiente dureza del árido que determina fenómenos atrición y formación de finos con disminución simultánea de huecos.
- Degradaciones variadas del agregado pétreo.

Es un mineral compuesto básicamente por carbonato, cuya función es la de mejorar la distribución granulométrica.



*Figura 2.25 Deformaciones plásticas permanentes en pavimentos asfálticos.
(MEZCLAS ASFALTICAS, ALEJANDRO PADRILLA RODRIGUEZ, PAG 63 y 64)*

CAPITULO III. ANALISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS UTILIZADOS EN EL SALVADOR.

3.1 REGISTRO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO ASFALTICO DE EL SALVADOR.

3.1.1 DETERMINACION DE TEMPERATURA DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS DE EL SALVADOR.

El proceso de selección de ligantes asfálticos para producir mezclas asfálticas en El Salvador en base a la susceptibilidad térmica del asfalto, objetivo principal de la investigación, se realizara utilizando las dos metodologías descritas más adelante en el presente capitulo. Dichas metodologías se basan en información climatológica de la zona de emplazamiento del proyecto donde se incorporara la mezcla asfáltica.

En la presente investigación se ha utilizado registros históricos de temperatura del aire y registros de temperatura de la superficie del pavimento, correspondientes a zonas representativas del país, la elección de dichas zonas se realizo en base al documento **Selección del tipo de cemento asfaltico para producir mezclas asfálticas en caliente en El Salvador**, desarrollado por la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial (UIDV) del Ministerio de Obras Publicas (MOP). También se considera en la presente investigación, los resultados de ensayos de laboratorio, realizados en muestras de ligantes asfálticos comúnmente comercializados en el país para la producción de mezclas asfálticas en caliente (AC-20, AC-30 y MODIFICADO TIPO E3), y el ensayo CANTABRO a briquetas cilíndricas de mezcla abierta para la determinación de la Susceptibilidad Térmica, desarrollados todos estos ensayos en el laboratorio de Asfaltos de Centro América, ASFALCA S.A de C.V. En los siguientes apartados se detallan aspectos generales del proceso de determinación de la temperatura del pavimento y un resumen de los resultados obtenidos.

3.1.2 ANALISIS DE REGISTROS HISTORICOS DE TEMPERATURA DEL AIRE EN EL TERRITORIO DE EL SALVADOR.

Se solicito información de distintas estaciones meteorológicas del territorio nacional a la Dirección General de Observatorio Ambiental (DGOA) del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), relacionadas a las temperaturas máximas y mínimas del aire en un periodo de 20 años, sin embargo no se obtuvo ninguna respuesta, razón por la cual se decidió utilizar los datos de

los años 1983 a 2002 contenidos en el documento elaborado por la UIDV mencionado anteriormente ya que los criterios utilizados para la elección de dichas estaciones meteorológicas se apegan a la consecución de los objetivos propuestos para esta investigación, dichos criterios son:

- a) Ubicación geográfica.
- b) Temperatura promedio de la zona y
- c) Disponibilidad de registros de temperatura para el periodo mínimo de análisis que exige el método SUPERPAVE (20 años mínimo)
(*Asphalt Institute, SHRP, 1994, pág. 24*).

En la tabla 3.1 se detallan las estaciones meteorológicas utilizadas para el desarrollo de la metodología y en la figura 3.1 se detalla la ubicación de cada una de las mismas.

No	Estación Meteorológica	Ubicación (Departamento)	Identificación de Estación Meteorológica	Elevación (m.s.n.m)	Latitud	Longitud
1	La Unión	La Unión	N-15	10	13°19.9'	87°52.9'
2	Acajutla	Sonsonate	T-6	15	13°34.4'	89°50.0'
3	Puente Cuscatlán	San Vicente	V-9	20	13°36.1'	88°35.6'
4	El Papalón	San Miguel	M-6	80	13°29.0'	88°10.0'
5	Cerrón Grande	Cabañas	B-10	200	13°56.3'	88°47.1'
6	San Andrés	La Libertad	L-4	460	13°48.5'	89°24.4'
7	El Palmar	Santa Ana	A-12	725	13°58.6'	89°34.2'
8	Perquin	Morazán	Z-3	1225	13°57.5'	88°09.7'
9	Las Pilas	Chalatenango	G-13	1960	14°21.9'	89°05.4'
10	Planes de Montecristo	Santa Ana	A-31	1971	14°23.9'	89°21.6'

Tabla 3.1. Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación.

Fuente: adaptado de Selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en caliente en El Salvador, UIDV, MOP.



Figura 3.1 Esquema de ubicación de Estaciones Meteorológicas utilizadas para la investigación.
 Fuente: adaptado de Selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en caliente en El Salvador, UIDV, MOP.

La información de temperatura del aire, registrada en cada una de las estaciones meteorológicas antes indicadas, corresponde a temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales, en el periodo comprendido entre 1983 y 2002. Cabe señalar que algunas estaciones meteorológicas no poseen información en ciertos lapsos de tiempo de dicho periodo, muy probablemente asociados a desperfectos de las estaciones meteorológicas y/o limitantes en el acceso a la zona donde éstas se localizan. En Anexo A se presenta de forma gráfica los registros de temperatura máximas y mínimas promedio mensuales del período enero/1983 diciembre/2002 para cada una de las estaciones meteorológicas antes señaladas.

3.2 EVALUACION DIRECTA DE LA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO ASFALTICO EN LAS CARRETERAS DE EL SALVADOR.

Para la evaluación de la temperatura de los pavimentos asfálticos utilizados en El Salvador se emplearon las divisiones políticas por zona que existe en el territorio nacional; zona occidental, zona central y zona oriental tal como lo muestra la figura 3.2.



Figura 3.2 Mapa de El Salvador que muestra las zonas geográficas en la cual el territorio nacional se divide.

El estudio de todo el territorio nacional suponía una tarea muy extensa ya que se tenía que determinar la temperatura del pavimento para cada departamento, es por ello que se tomó la decisión de delimitar el área geográfica a tres zonas, las cuales se muestran en la figura 3.2, y de estas tres zonas se tomaron tres puntos de carretera distintos, obteniendo así tres temperaturas de pavimentos por cada zona teniendo un total de nueve a nivel nacional.

Para la obtención de las temperaturas del pavimento, producto de la evaluación directa, a la cual la carretera está expuesta según la zona en la que se encuentra se emplearon dos métodos de investigación:

- Método SUPERPAVE.
- Método de campo.

3.2.1 METODO SUPERPAVE

El método SUPERPAVE²⁹ permite determinar la temperatura del pavimento a una profundidad específica (20mm) mediante el empleo de una fórmula de conversión de temperatura del aire a temperatura del asfalto.³⁰

La selección de la temperatura del pavimento asfáltico, a partir de la temperatura del aire, es obtenida de la base de datos de las estaciones meteorológicas del ESNET, de las cuales se determina la temperatura promedio del aire correspondiente al periodo de siete días continuos más calientes registrados en cada una de las estaciones meteorológicas que se incluyan en la investigación.

Según los investigadores del programa SHRP³¹, el valor promedio de esos siete días es considerado como un método óptimo para caracterizar la condición de diseño para altas temperaturas. (*Morales & Alvarenga, 2010, págs. 36-38*) Para cada año del que se disponen datos, se determina el periodo de siete días más cálidos y se calcula el promedio de la temperatura del aire para esos siete días consecutivos. Para todos los años registrados se calculan un valor medio y la desviación estándar. Así mismo, se identifica el día más frío de cada año y el valor medio y la desviación estándar son calculados. (*Asphalt Institute, SHRP, 1994, págs. 64-66*)

Es importante considerar que la temperatura que será utilizada en la selección del grado de ligante asfáltico corresponde a la temperatura del pavimento y no a la temperatura del aire. Al respecto, SUPERPAVE define la máxima temperatura de diseño del pavimento a una profundidad de 20 mm bajo la superficie y la mínima temperatura de diseño del pavimento en la superficie del pavimento. Con el objetivo de determinar la temperatura del pavimento de manera indirecta, se han desarrollado modelos, considerando entre otros parámetros valores típicos de absorción solar, transmisión de radiación a través del aire, radiación atmosférica y velocidad del aire.

La fórmula desarrollada para determinar la máxima temperatura del pavimento a 20mm de la superficie, es la siguiente:

$$T_{20mm} = (T_{aire} - 0.00618Lat^2 + 0.2289Lat + 42.2)(0.9545) - (17.78)$$

²⁹ SUPERIOR PERFORMING ASPHALT PAVEMENT.

³⁰ Para más detalles del método SUPERPAVE referirse a la sección 3.6.1.

³¹ STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (Programa de Investigación para Carreteras Estratégicas).

Donde:

$T_{20\text{mm}}$ = Máxima temperatura de diseño del pavimento a una profundidad de 20 mm (°C)

T_{aire} = Temperatura promedio máxima del aire correspondiente al periodo de siete días continuos más calientes (°C).

Lat. = Latitud geográfica del proyecto o punto de análisis en grados.

3.2.2 METODO DE CAMPO.

Se ejecutara solo en carreteras que estén en funcionamiento de las tres zonas del país, **occidente, centro y oriente**, en las cuales se realizara el ensayo para la determinación de la temperatura del asfalto a 20mm de profundidad de la capa de rodamiento.

La medición de la temperatura superficial de la capa de rodadura del pavimento, fue llevada a cabo considerando uno de los procedimientos indicados en el documento **“Las predicciones de temperatura y los factores de ajuste de Pavimento de Asfáltico”** de la Administración Federal de Autopistas.

El ensayo de medición de temperatura consiste en realizar perforaciones de 25 mm de profundidad con la ayuda de una almádana y un punzón previamente graduado y posteriormente verter aceite térmico dentro del orificio de 2.5 cm de profundidad para luego tomar el dato de la temperatura del aceite con la ayuda de un termómetro de espiga, la toma de la temperatura se lleva a cabo luego de que la aguja del termómetro se ha estabilizado, la figura 3.3 muestra de forma esquemática el proceso descrito anteriormente.

La función del aceite térmico es la de transmitir la temperatura del asfalto hacia el aceite, esta temperatura deberá ser tomada entre un periodo de tiempo de 09:00am a 3:00pm con la finalidad de poder tener un registro de los datos de temperaturas del pavimento a lo largo del periodo de estudio determinado previamente.

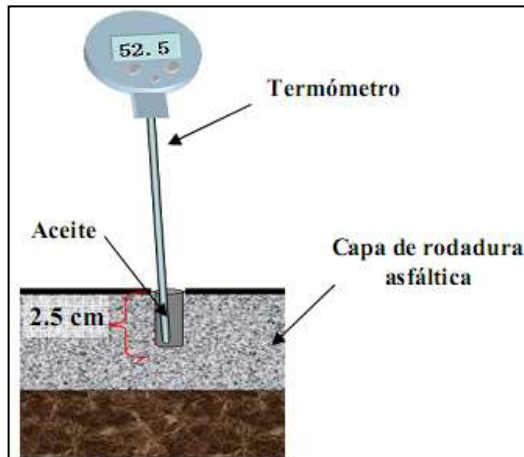


Figura 3.3. Muestra un esquema de medición de temperatura del pavimento.

3.2.2.1 DESARROLLO DEL METODO DE CAMPO.

ESTABLECER EL MEJOR CITIO PARA DETERMINAR LA TEMPERATURA EN LA CARRETERA SELECCIONADA.

Para establecer el mejor sitio de la carretera es conveniente tomar en cuenta la importancia que el sol mantenga de forma constante su radiación sobre todo el tramo de carretera en la cual se perforaran los orificios, por ende se procura tomar tramos abiertos de carretera en la cual no allá ningún tipo de obstáculo a la radiación solar como árboles, muros, cerros, etc., de igual forma es conveniente seleccionar carreteras con tráfico vehicular fluido ya que éste transmite calor hacia la carretera por medio de la fricción que las llantas ejercen a la carretera. Una vez ya seleccionado el sitio se coloca el cono de seguridad el cual permite trabajar tranquilamente con un tráfico vehicular constante.



Figura 3.4. Muestra el galón de aceite térmico y otras herramientas utilizadas para la toma de temperatura en campo.

PERFORAR LOS AGUJEROS EN LA CARRETERA.

En esta etapa del método una vez seleccionado el sitio más idóneo para realizar el ensayo se procede a perforar los distintos agujeros que se utilizarían a lo largo del día en el tramo de carretera, la separación entre agujeros se estableció de 10.0 cm por conveniencia, para perforar los agujeros se empleo una almádana, y un punzón el cual fue graduado con la finalidad de perforar exactamente los 2.5cm de profundidad que son necesarios para el desarrollo del método.

La perforación de más de un agujero, por cada carretera a la cual se le determino la temperatura superficial, para esta investigación fue necesaria pues en el proceso del desarrollo de campo se percibió que el exceso de humedad producto de varias aplicaciones de aceite térmico a un mismo agujero generaba un error en la marcación del termómetro, arrojando datos que no concordaban según la hora del día o arrojando valores de temperatura que se mantenían estáticos aun fueran tomados a distintas horas del día, es por ello que para cada carretera se debió perforar más de un agujero logrando de esta forma una mejor recolección de datos de temperatura.



Figura 3.5. Zona de medición carretera a Acajutla departamento de Sonsanote. Integrante del grupo de investigación iniciando la etapa de perforación de agujeros sobre la carretera.

VERTER EL ACEITE TERMICO EN EL AGUJERO.

Una vez perforado el agujero se procede al vertido del aceite térmico proporcionado por la empresa ASFALCA, el vertido de dicho aceite se realiza por lo menos 15.0min antes de tomar el dato de temperatura por cada media hora según sea necesario ya que en algunos puntos ensayados el aceite se absorbía

más rápidamente con respecto a otros puntos esto obligaba algunas veces a verter aceite a el agujero cada vez que se tomaría el dato de temperatura.



Figura 3.6. Zona de medición carretera a Cerro Verde departamento de Santa Ana. Integrantes del grupo de investigación vertiendo aceite térmico dentro de los agujeros previamente perforados.

TOMA DE COORDENADAS GEOGRAFICAS DEL PUNTO EN ESTUDIO.

La toma de coordenadas se realiza para cada tramo de carretera para la cual se realizo el ensayo, la toma de las coordenadas permitirá el empleo de la formula SUPERPAVE para cada punto ensayado. Para la toma de las coordenadas se empleo un GPS con una precisión de posicionamiento de 3.0mts es decir un 95%. La información obtenida de las coordenadas de cada punto se presenta en la tabla 3.3 y en el anexo D se muestra el mapa de El Salvador especificando las zonas de medición de temperatura del pavimento asfaltico generado en base a los datos de coordenadas obtenidas en campo.



Figura 3.7. Zona de medición carretera de Metapán departamento de Santa Ana. Integrante del grupo de investigación tomando los datos de coordenadas geográficas del punto donde se tomara la temperatura del pavimento.

TOMA DE DATOS DE TEMPERATURA.

En esta etapa del método se procede a tomar los datos de temperatura de la carretera a cada de 30 min, desde las 9:00 am hasta las 3:00 pm, la información obtenida al final del día, de cada carretera a la cual se le determine su temperatura superficial, nos permite evaluar el comportamiento de la temperatura de la carretera por medio de graficas y establecer la máxima temperatura de servicio a la cual se ve expuesta cada carretera, las graficas de registros de temperatura del pavimento generadas con la temperatura obtenida en campo se presentan en el anexo B.

La toma de temperaturas en periodos de cada media hora permitirá generar graficas más tendidas y más detalladas en cuanto a los cambios de temperatura a los cuales se ve expuesta la carretera.

Como un dato importante en el proceso de toma de temperaturas se debe aclarar que cada 15 minutos previos a la hora en que se debe tomar la temperatura se verifica que la cantidad de aceite térmico colocado dentro del agujero, producto de la toma anterior, sea la necesaria para poder tomar un buen dato de temperatura de lo contrario debe verterse más aceite ya que en diversas ocasiones el aceite fue absorbido completamente por la carretera generando un retraso en la toma de las temperaturas ya que la transferencia de calor del aceite no es inmediata.



Figura 3.8. Muestra la colocación del termómetro de espiga en el agujero y la forma en la cual se toman los datos de temperatura

ANOTACION EN BITACORA DE TODOS LOS DATOS IMPORTANTES.

Para esta etapa se empleo el uso de una bitácora en la cual se toman todos los datos importantes como la temperatura por cada media hora de cada apunte producto del desarrollo del método para determinar la temperatura superficial de la carretera, datos ambientales o atmosféricos como el clima y la temperatura ambiente y observaciones generales que permitan mejorar el método las cuales son presentadas en esta sección.



Figura 3.9. Integrantes del grupo de investigación realizando anotaciones en bitácora.



Figura 3.10. Anotaciones en bitácora de la temperatura a la cual se encuentra el pavimento asfáltico y de las condiciones climáticas adversas para el desarrollo de la investigación.

3.2.3 PRESENTACION DE RESULTADOS DE LA EVALUACION.

INFORMACION DE TEMPERATURAS MENSUALES. (°C)		ZONAS DE MEDICION DEL TERRITORIO NACIONAL.								
		ZONA OCCIDENTAL.			ZONA CENTRAL.				ZONA ORIENTAL.	
		SANTA ANA (METAPAN).	SANTA ANA (CERRO VERDE).	SONSONATE (ACAJUTLA).	SAN SALVADOR (SAN SALVADOR).	CHALATENANGO (DESVIO AMAYO).	LA PAZ (ZACATECOLUCA, DESVIO A COMALAPA CARRETERA DEL LITORAL).	SANVICENTE (PUENTE CUSCATLAN).	MORAZAN (SANFRANCISCO GOTERA).	SAN MIGUEL (DESVIO EL DELIRIO).
jul-2011	T - Ambiente	31	33	36	34	40	37	38	42	39
	T- Campo	56	52	65	52	63	58	59	61	61
	T-20mm	54.009	55.889	58.742	56.838	62.587	59.69	60.649	64.474	61.588
ago-2011	T - Ambiente	33	31	38	35	39	40	36	44	40
	T- Campo	46	51	64	42	63	60	61	60	63
	T-20mm	55.918	53.98	60.651	57.793	61.633	62.553	58.74	66.383	62.542
sep-2011	T - Ambiente	32	34	39	33	38	36	37	46	41
	T- Campo	59	50	67	53	57	64	63	63	65
	T-20mm	54.963	56.844	61.605	55.884	60.678	58.735	59.694	68.292	63.497

SIMBOLOGIA: **T-Ambiente**=Temperatura ambiente **T-Campo**=Temperatura tomada en campo **T-20mm**=Temperatura a 20mm de profundidad.

Tabla 3.2. Se muestran los datos de temperatura ambiente obtenidos mediante las graficas proporcionadas por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), ver anexo A, las temperaturas del pavimento asfaltico obtenidos en campo y la temperatura obtenida mediante la metodología SUPERPAVE a 20mm de profundidad.

CUADRO DE COORDENADAS DE LAS ZONAS DE MEDICION.									
	ZONA OCCIDENTAL.			ZONA CENTRAL.			ZONA ORIENTAL.		
	SANTA ANA (METAPAN).	SANTA ANA (CERRO VERDE).	SONSONATE (ACAJUTLA).	SAN SALVADOR (SAN SALVADOR).	CHALATENANGO (DESVIO AMAYO).	LA PAZ (ZACATECOLUCA, DES A COMALAPA CARRETERA DEL LITORAL).	SANVICENTE (PUENTE CUSCATLAN).	MORAZAN (SANFRANCISCO GOTERA).	SAN MIGUEL (DESVIO EL DELIRIO).
Latitud (N)	14°19'15.7"	13°47'18.3"	13°35'18.7"	13°41'21.9"	14°5'36.3"	13°28'43.8"	13°33'23.6"	13°40'25.4"	13°17'54.8"
Longitud (W)	89°26'12.2"	89°33'23"	89°50'4.3"	89°13'54.6"	89°8'50.3"	89°3'40.9"	89°35'18.2"	89°5'13.3"	89°46'20.7"
COORDENADAS EN GRADOS.									
Latitud (N)	14.321°	13.788°	13.589°	13.689°	14.093°	13.479°	13.557°	13.674°	13.299°
Longitud (W)	89.437°	89.556°	89.835°	89.232°	89.147°	89.061°	89.588°	89.087°	89.772°

Tabla 3.3. Datos de coordenadas geográficas de cada punto de investigación en campo obtenidos por medio de GPS.

3.2.4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS PRODUCTO DE LA EVALUACION DIRECTA DE LA TEMPERATURA DEL PAVIMENTO ASFALTICO EN LAS CARRETERAS DE EL SALVADOR.

La información obtenida del empleo del método de campo con la cual se generó la tabla 3.2 presentada previamente, nos permiten realizar gráficas de registros de temperatura del pavimento en zonas de medición, las cuales presentamos en el Anexo B. Dichas gráficas nos permiten ver el comportamiento de la temperatura del pavimento a lo largo de un día para los meses de *Febrero*, *Marzo*, *Julio*, *Agosto* y *Septiembre* del año 2011, es importante aclarar que los meses de *Febrero* y *Marzo* fueron proporcionados por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) específicamente por la unidad de investigación de dicha institución mediante el documento “SELECCION DEL TIPO DE CEMENTO ASFALTICO PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE EN EL SALVADOR”.

Las gráficas nos presentan cuáles han sido los meses más cálidos y las temperaturas más altas a las cuales se han visto expuestas las distintas carreteras que hemos estudiado, de dichas gráficas podemos establecer que para la zona occidental específicamente Sonsonate tenemos que el mes de Septiembre la temperatura de la carretera en el punto tomado en Acajutla alcanzó una temperatura de 67°C siendo esta temperatura la más alta registrada en el pavimento de la zona occidental, para la zona central en el departamento de La Paz específicamente en el desvío al litoral la temperatura alcanzada fue de 64°C registrada el mes de Septiembre siendo esta temperatura la más alta alcanzada en la zona central, para la zona oriental la temperatura más alta registrada en el pavimento fue de 65°C de igual forma para el mes de Septiembre específicamente en el departamento de San Miguel en el punto ubicado en el lugar conocido como el Desvío el Delirio; lo anterior nos indica que el mes más cálido al cual el pavimento se vio sometido fue el de Septiembre a nivel nacional ya que los resultados obtenidos tanto para la zona occidental, central y oriental nos arrojan que la temperatura del asfalto más alta rondó el rango de entre 64°C y 67°C en dicho mes siendo estas temperaturas tomadas entre las horas de las 12:30pm y las 2:00pm, ver anexo B.

Lo descrito anteriormente se puede verificar claramente observando la tendencia de las gráficas de forma individual para cada mes, ahí se puede observar que todas las gráficas presentan una forma parabólica mas sin embargo las del mes de septiembre de cada gráfica presenta una tendencia más definida de la parábola, dicho de otra forma la parábola de los meses de Septiembre es más

pronunciada respecto a los otros meses que muestran una parábola mas tendida en el mismo periodo de tiempo, ver anexo B.

La información obtenida del empleo del método SUPERPAVE fue generada mediante la fórmula que se presenta a continuación:

$$T_{20mm} = (T_{aire} - 0.00618Lat^2 + 0.2289Lat + 42.2)(0.9545) - (17.78)$$

La información de la variable temperatura del aire (T_{aire}) solicitada por la formula fue extraída de las graficas proporcionadas por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), las cuales se presentan en el Anexo A del presente documento, estas graficas presentan los promedios mensuales de las temperaturas máximas y mínimas para el periodo del enero/1983 – diciembre/2002 en la tabla 3.2 se muestra esta información como Temperatura ambiente ($T_{ambiente}$). La latitud (Lat) es otra variable solicitada por la fórmula para poder ser aplicada, esta variable fue extraída de la información de campo mediante el empleo de un GPS con el cual se tomaron las coordenadas de todos los puntos de las distintas carreteras donde se aplico el método de determinación de temperatura en campo, la tabla 3.3 presenta las coordenadas geográficas de todos los puntos estudiados.

Como parte del análisis podemos observar en la tabla 3.2 que tanto el método de campo como el método SUPERPAVE proporcionan información semejante de las temperaturas extraídas producto de la utilización de ambos métodos ya que en dicha tabla podemos comparar ambos resultados observando que son similares.

El análisis general de los resultados de método SUPERPAVE muestran que de igual forma que en el método de campo el mes de Septiembre es el mas cálido para las zonas occidental y oriental del país ya que en estas zonas las máximas temperaturas del pavimento registradas alcanzaron valores de 61.605°C y 68.292°C respectivamente, ver tabla 3.2, mientras que para la zona central la temperatura máxima se registro en el mes de Julio alcanzando un valor de 62.587°C, ver tabla 3.2, esta diferencia generada respecto al método anterior es porque el método SUPERPAVE se basa en la temperatura ambiente promedio máxima de un periodo de tiempo especifico (siete días continuos más cálidos), mas sin embargo el método de campo no toma en cuenta la variable de la temperatura ambiental en periodos de tiempo pues el resultado obtenido mediante el método de campo se ve influenciado por las condiciones ambientales que están generándose en el momento en el cual se está aplicando el método.

A continuación se muestra un mapa del territorio nacional en el cual se presenta la ubicación de las estaciones meteorológicas y la ubicación de los puntos en los

cuales se aplico el método de determinación de la temperatura de una carretera mediante el método de campo.



Figura 3.11 Esquema de ubicación de estaciones meteorológicas y puntos de mediciones de temperatura en campo.

3.3 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS LIGANTES ASFALTICOS.

3.3.1 COHESIÓN.

La misión del ligante bituminoso es aglomerar los distintos elementos del árido, proporcionando cohesión a la mezcla. Esta propiedad fundamental del ligante no es valorada, en general, por los ensayos convencionales de caracterización de ligantes.

El ensayo cántabro de pérdida por desgaste fue desarrollado como un procedimiento para valorar, precisamente, la cohesión de las mezclas abiertas, por lo que la determinación de las pérdidas por desgaste, en determinadas condiciones, permitirá valorar la cohesión que el ligante proporciona a la mezcla.

(Miro Recasens & Pérez Jiménez, 1994, págs. 5-6)

3.3.2 SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA.

Los ligantes bituminosos se caracterizan por tener un comportamiento frágil a bajas temperaturas, un comportamiento elasto-plástico a temperaturas medias y un comportamiento inconsistente a temperaturas altas, figura 3.12 (Ing. Ciria Piedrahita Céspedes, 2010, págs. 8-9)

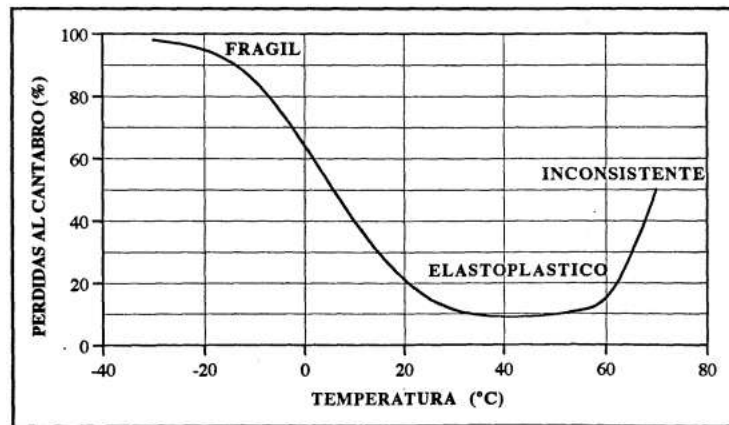


Figura 3.12 Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes Bituminosos (CURVA DE ESTADO)

Esta variación del comportamiento del ligante con la temperatura puede ser evaluada y cuantificada mediante el empleo del ensayo cántabro de pérdida por desgaste. La determinación, en condiciones especiales, de las pérdidas por desgaste a distintas temperaturas, pone de manifiesto el comportamiento FRÁGIL del ligante, altas pérdidas al cántabro, su comportamiento ELASTO-PLÁSTICO, pérdidas bajas al cántabro, y su INCONSISTENCIA, fuerte incremento de las pérdidas.

Mediante la determinación de la curva *pérdidas al cántabro-temperatura* (curva de estado) se puede evaluar la susceptibilidad térmica de los ligantes y comprobar su comportamiento, diferenciando el comportamiento de los betunes modificados. Ver sección 3.5.3.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DL ENSAYO CÁNTABRO, ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA.

3.3.3 ADHESIVIDAD ÁRIDO-LIGANTE.

El ligante bituminoso debe ser capaz de envolver a los áridos, dando cohesión a la mezcla y resistir la acción de desmenuamiento del agua. Por efecto del agua, el ligante

se separa del árido y disminuye así la cohesión de la mezcla. (Ing. Cira Piedrahita Céspedes, 2010, págs. 8-9)

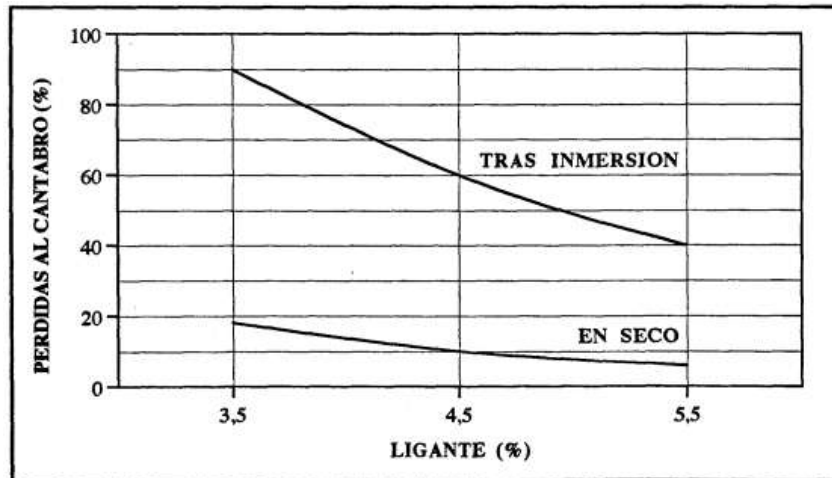


Figura 3.13 Evaluación de la adhesividad árido-ligante. Pérdidas al cántabro en Seco y tras inmersión.

Mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste se puede valorar la adhesividad árido-ligante, determinando las pérdidas de la mezcla cuando ésta se ensaya en seco o tras permanecer cierto tiempo sumergida en agua. El incremento de las pérdidas, figura 3.13, está directamente relacionado con la mejor o peor adhesividad del ligante al árido.

3.3.4 ENVEJECIMIENTO.

La resistencia al envejecimiento de los ligantes bituminosos por la acción de los rayos ultravioletas y los agentes atmosféricos como: aire, calor, agua, etc. es una propiedad de los ligantes relacionada muy directamente con su durabilidad. Cuanto más rápida sea esta oxidación o envejecimiento, mayor será la rapidez con la que el ligante se volverá frágil, disminuyendo su resistencia a la acción abrasiva del tráfico.

Este efecto de envejecimiento se puede simular y acelerar en el laboratorio y mediante el ensayo cántabro evaluar como dicho proceso va afectando a las características del ligante. Se obtiene así una curva pérdidas al cántabro-tiempo de envejecimiento, claramente relacionada con el endurecimiento del ligante, figura 3.14

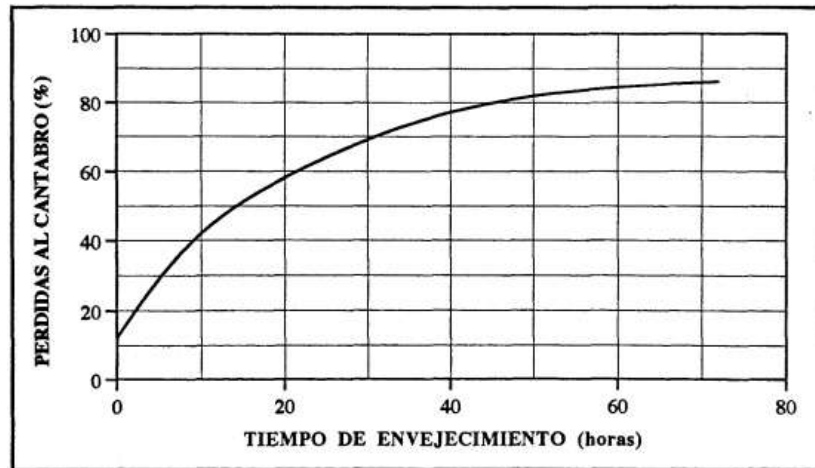


Figura 3.14 Curva de envejecimiento, relaciona el tiempo de envejecimiento respecto a la pérdida al cántabro.

3.4 CARACTERISTICAS TERMICAS DE LOS MATERIALES PARA LA ELABORACION DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE.

3.4.1 AGREGADOS PETREOS.

3.4.1.1 DEFINICIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS.

Son materiales granulares sólidos e inertes que se emplean en las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes como ligantes asfálticos. *(Rodríguez, Alejandro Padilla, 2000, págs. 5-7)*

3.4.1.2 TIPOS DE AGREGADOS PÉTREOS.

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos: *(Rodríguez, Alejandro Padilla, 2000, págs. 5-7)*

a) Agregados Naturales.

Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.

b) Agregados Triturados.

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera. Se incluyen todos los materiales canterables cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

c) Agregados Artificiales.

Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.

d) Agregados Marginales.

Los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

3.4.1.3 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

Las propiedades de los agregados se pueden conceptuar bajo dos puntos de vista: uno como elementos aislados, o individuales, y otro como conjunto. *(Rodríguez, Alejandro Padilla, 2000, págs. 5-7)*

Propiedades individuales.

Los agregados como elementos aislados tienen propiedades físicas macroscópicas: dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, módulo elástico, conductividad térmica, dilatación, etc.

Propiedades de conjunto.

Las propiedades de conjunto de los agregados pétreos son sus características como un todo. La distribución de la redondez o desgaste de los agregados es una propiedad de gran interés, por cuanto va influir sobre el rozamiento entre los elementos del agregado.

3.4.1.4 NATURALEZA PETROLÓGICA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

Desde un punto de vista práctico, los agregados se pueden clasificar en tres grandes grupos: *(Rodríguez, Alejandro Padilla, 2000, págs. 5-7)*

1. Agregados calizos,
2. Agregados silíceos
3. Agregados ígneos
4. Metamórficos.

Agregados Calizos.

La roca caliza es muy común, abundante y económica en los procesos de trituración, se emplea generalmente en todas las capas de los firmes, exceptuándose en algunas ocasiones como agregado grueso en las capas de rodadura, debido a la facilidad que tiene de pulimentarse en condiciones de servicio, su carácter es básico, presenta por lo regular menores problemas de adhesividad, es decir, de afinidad con los ligantes asfálticos. En mezclas asfálticas se utiliza para mejorar esta característica cuando se emplean además otro tipo de agregados, más duros pero también más ácidos (silíceos, pórfidos, entre otros).

Agregados Silíceos.

Los agregados silíceos procedentes de trituración de gravas naturales es otro material de amplia utilización en las todas capas de los firmes. Se extraen de yacimientos granulares, en los que las partículas de mayor tamaño se separan por cribado y a partir de ellas por machaqueos sucesivos, se obtienen fracciones de menor tamaño, con una angulosidad tanto mayor cuantas más caras de fractura presenten. Pueden no aportar una suficiente adhesividad con los ligantes asfálticos, sin embargo, si el material obtenido tiene un elevado contenido de sílice y de caras de fractura, sus características mecánicas y su rozamiento interno proporcionan un esqueleto mineral bueno para utilizarlo incluso en mezclas asfálticas sometidas a la acción directa del tráfico.

Agregados Ígneos y Metamórficos.

Son materiales que por sus características resultan muy adecuados para utilizarlos como agregado grueso en las capas de rodadura. Pueden incluirse en este grupo los basaltos, gabros, pórfidos, granitos, cuarcitas, etc. Sus cualidades para resistir al pulimento los hacen idóneos para garantizar la textura superficial necesaria en un periodo de tiempo, incluso con tráficos muy intensos. En este grupo tan amplio,

los agregados de naturaleza más ácida pueden presentar una deficiente adhesividad con los ligantes asfálticos, pero en la mayoría de los casos el problema se puede resolver con activantes que son sustancias que tienen la misión específica de mejorar la adhesividad con los ligantes, o también el problema se resuelve empleando emulsiones adecuadas y en el caso de mezclas asfálticas, con el empleo de finos de naturaleza básica y un polvo mineral adecuado.

3.4.1.5 CONSIDERACIONES ACERCA DEL EMPLEO DE LOS AGREGADOS PÉTREOS.

Cuando se pretende hacer uso de los agregados pétreos para la construcción de pavimentos se deben considerar algunos aspectos fundamentales para su buen desempeño a la hora de formar parte en alguna de las capas del pavimento y principalmente en la elaboración de las mezclas asfálticas. *(Rodríguez, Alejandro Padilla, 2000, págs. 5-7)*

Naturaleza e identificación:

Evaluación de la naturaleza petrográfica de los agregados, grado de alteración de los componentes minerales, porosidad y propiedades químicas.

Propiedades geométricas:

Principal y básicamente la forma y angulosidad de las partículas; con relación al conjunto del esqueleto mineral se estudia la distribución granulométrica.

Propiedades mecánicas:

Engloban los parámetros básicos de resistencia al desgaste y al pulimento.

Ausencia de impurezas:

Es fundamental que los agregados a emplear en la construcción de pavimentos estén libres de impurezas capaces de afectar el buen comportamiento de las capas. El empleo de agregados sucios en la construcción de un pavimento, puede ser una causa suficiente para provocar su degradación.

Inalterabilidad:

Es imprescindible la evaluación de las posibles degradaciones que puedan sufrir los agregados pétreos que se van a utilizar en una obra; así, los materiales

evolutivos han de ser empleados con especiales precauciones para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar la vida útil de las capas.

Adhesividad:

Los agregados pétreos han de ser afines con los ligantes asfálticos que vayan a ser empleados en la construcción del pavimento, y en caso de problemas de afinidad, será necesario el uso de activantes, para garantizar el buen comportamiento de las mezclas asfálticas.

3.4.2 LIGANTES ASFÁLTICOS.

La caracterización del cemento asfáltico se ha realizado hasta el presente a partir de sus propiedades mecánicas, reológicas y químicas, utilizándose para tal fin una serie de ensayos de base empírica y científica con los que se obtiene una pauta de las propiedades del cemento asfáltico, pero que solo establecen de manera indirecta el comportamiento en servicio de éste como material componente de una mezcla asfáltica.

Los ensayos comúnmente utilizados para determinar las características de los cementos convencionales (sin modificar), son los de *punto de ablandamiento, penetración, ductilidad, punto de inflamación, viscosidad, envejecimiento en película delgada y contenido de asfaltenos, maltenos, resinas y aromáticos*. Los resultados y análisis de estos ensayos han sido el instrumento de selección de los asfaltos en función de los requerimientos de la mezcla en servicio.

De los conceptos descritos anteriormente de Punto de ablandamiento, Viscosidad, Penetración y Punto de inflamación; en la sección 2.3.7, se presenta una breve descripción de los ensayos a continuación:

3.4.2.1 ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO ASTM D36³²

Introducción.

Los asfaltos son materiales termoplásticos, por lo cual no puede hablarse de un punto de fusión en el término estricto de la palabra. Se establece entonces un punto de ablandamiento, determinado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado de fluidez. Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a

³² ASTM D36 / D36M-12 Método de prueba estándar para el Punto de reblandecimiento del betún (anillo y bola del aparato)

diferentes temperaturas. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo del anillo y bola.

Equipo.

- Porta anillos y ensamblaje
- Esferas
- Guías de Centrado
- Anillos
- Termómetro.



Figura 3.15 Equipo para la determinación del punto de ablandamiento (ASTM D36). La imagen muestra algunos de los instrumentos utilizados para la realización del ensayo.

Procedimiento.

1. Para el llenado, los anillos deberán ser colocados sobre una placa de bronce previamente amalgamada para evitar la adherencia.
2. Las muestras blandas deberán enfriarse por un lapso de 30 min a una temperatura de 10°C por debajo del punto de ablandamiento previsto. Una vez enfriadas las muestras se quitará el exceso de material.
3. Seleccionar, dependiendo del punto de reblandecimiento esperado, el baño líquido y el termómetro adecuados, de los siguientes:
 - a) Agua destilada fresca y hervida para puntos de reblandecimiento entre 30°C y 80°C (86°F y 176°F); usar termómetro 15°C o 15°F. La temperatura inicial del baño será 5±1°C (41± 2°F).
 - b) Glicerina USP para puntos de reblandecimiento sobre 80°C (176°F) y bajo 157°C (315°F); usar termómetro 16°C o 16°F. La temperatura inicial del baño será 30±1°C (86± 2°F).

- c) El glicol etileno para puntos de reblandecimiento entre 30°C y 110°C (86°F y 230°F); usar termómetro 16°C o 16°F. La temperatura inicial del baño será 5±1°C (41±2°F).
 - d) Para los propósitos de la referencia, todo punto de reblandecimiento menor a 80°C (176°F) se determinará en un baño de agua y todo punto de reblandecimiento sobre 80°C (176°F) se determinara un baño de glicerina.
4. Se ensambla el sistema, colocando los anillos con la muestra, las guías que centran las esferas, y el termómetro en posición, y llenando el baño una profundidad de 105 ± 3 mm (4½±1/8) pulg.
 5. Usando las pinzas, colocar las dos esferas en el fondo del baño para que adquieran la misma temperatura de inicio que el resto del ensamblaje durante 15 min.
 6. Colocar todo el conjunto del baño, en agua con hielo o caliéntese muy suavemente, para alcanzar y mantener durante 15 minutos la temperatura de iniciación apropiada.
 7. Con las pinzas, poner cada una de las esferas en cada guía de centrado.
 8. Calentar el baño e incrementar uniformemente la temperatura a razón de 5°C (9°F) por minuto.
 9. Registrar para cada anillo y esfera, la temperatura indicada por el termómetro al momento en que la esfera rodeada de betún toca la placa de soporte. Si la diferencia entre las dos temperaturas exceden 1°C (2°F), se repite la prueba.

Cálculos.

Los resultados obtenidos usando un baño de glicol etileno variarán si se usara agua y glicerina. Las fórmulas siguientes se usan para calcular las diferencias:

Asfalto:

$$\text{SP (glicerina)} = 1.026583 \times \text{SP (glicol etileno)} - 1.334938^{\circ}\text{C}$$

$$\text{SP (agua)} = 0.974118 \times \text{SP (glicol etileno)} - 1.44459^{\circ}\text{C}$$

Donde SP= *resultado del ensayo*.

Alquitrán:

$$\text{SP (glicerina)} = 1.044795 \times \text{SP (glicol etileno)} - 5.063574^{\circ}\text{C}$$

SP (agua) = 1.061111 x **SP** (glicol etileno) - 8.413488 °C

Donde SP= *resultado del ensayo*.

3.4.2.2 ENSAYO DE VISCOSIDAD ASTM D 2171³³

Introducción.

La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a las temperaturas que se emplean durante su aplicación.

La viscosidad se mide en el ensayo de viscosidad Saybolt–Furol o en el ensayo de viscosidad cinemática. La viscosidad de un cemento asfáltico a las temperaturas usadas en el mezclado (normalmente 135°C) se mide con viscosímetros capilares de flujo inverso o viscosímetros Saybolt; la viscosidad absoluta, a las temperaturas altas en servicio (60°C), generalmente se mide con viscosímetros capilares de vidrio al vacío.

En el ensayo Saybolt–Furol se emplea un viscosímetro Saybolt con orificio Furol. Se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho una cantidad específica de asfalto. Como las temperaturas a que se determina la viscosidad son frecuentemente superiores a los 100°C, el baño de temperatura constante del viscosímetro se llena con aceite; pero si se hace la prueba con un cutback³⁴, en éste caso, sí se puede utilizar agua. Cuando el asfalto ha alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide, en segundos, el tiempo necesario para que pasen a través del orificio Furol 60 ml del material. Los valores obtenidos se expresan como segundos Saybolt–Furol(SSF).

La viscosidad cinemática se mide, normalmente, con viscosímetros de tubo capilar de cristal. Este ensayo permite una mayor comodidad y exactitud en los resultados. La base de éste ensayo es la medida del tiempo necesario para que fluya un volumen constante de material bajo condiciones de ensayo, como temperatura y altura del líquido, rígidamente controladas. Los asfaltos presentan un amplio rango de viscosidades, siendo necesario disponer de diversos viscosímetros que difieren en el tamaño del capilar. Mediante el tiempo medido, en

³³ ASTM D2171 / D2171M - 10 Método de prueba estándar para la viscosidad de los asfaltos por viscosímetro capilar de vacío

³⁴ Asfalto rebajado, es un residuo del petróleo (asfalto) el cual se ha mezclado con destilados del petróleo.

segundos y la constante de calibración del viscosímetro, es posible calcular la viscosidad cinemática del material en la unidad fundamental, centiestokes³⁵.

Alcance

Este método describe el procedimiento para determinar la viscosidad cinemática de los asfaltos líquidos a 60 °C (140 °F) y de cementos asfálticos a 135°C (275 °F), en el rango de 6 a 100.000 mm²/s (cSt).

Equipo

- Viscosímetros (De tipo capilar, hecho de vidrio de borosilicato templado).
- Termómetros (De vidrio calibrado con una exactitud de 0.02 °C (0.04 °F) o cualquier otro dispositivo termométrico de exactitud igual).
- Baño (Adecuado para inmersión del viscosímetro y tal que la reserva de líquido o la parte superior del capilar, este mínimo a 20 mm por debajo del nivel superior del baño, y con visibilidad del viscosímetro y del termómetro).
- Cronómetro (Con aproximación de 0.1s o menos y precisión de 0.05% cuando se prueba a intervalos no menores de 15 min).



Figura 3.16 Equipo para la determinación del ensayo de viscosidad (ASTM D2170-01)

³⁵ Unidad de viscosidad cinemática (cst), es utilizada como unidad de medición de la viscosidad de los líquidos.

Procedimiento.

1. Para muestras con viscosidad cinemática a 60°C (140°F) sobre 800mm²/s (cSt), calentar 20mL de muestra en el recipiente sellado dentro del baño que se mantiene a 63°-3°C (145°-5°F) hasta que esté suficientemente líquido para ser trasladarlo al viscosímetro. El tiempo de calefacción no debe exceder 30 min.
2. Poner mínimo 20ml en un recipiente adecuado y calentarlo a 135°-5.5°C (275°-10°F), agitando ocasionalmente para prevenir sobrecalentamiento local y teniendo cuidado para evitar que quede aire atrapado.
3. Mantener el baño a la temperatura de prueba dentro de 0.01°C (0.02°F) para pruebas de temperatura de 60°C (140°F) y 0.03°C (0.05°F) para pruebas de temperatura de 135°C (275°F). Aplicar las correcciones necesarias, a todas las lecturas del termómetro.
4. Limpiar y secar el viscosímetro para que de un tiempo de flujo mayor de 60s y precalentar a la temperatura de prueba.
5. Cargar el viscosímetro de manera adecuada.
6. Dejar cargado en el baño al viscosímetro hasta que la muestra alcance la temperatura de prueba.
7. Inicie el flujo de asfalto en el viscosímetro.
8. Medir el tiempo requerido para que el borde guía del menisco pase de la primera marca hasta la segunda, con aproximación de 0.1s. Si este tiempo es menor de 60s, seleccionar un viscosímetro con diámetro capilar más pequeño y repetir la operación.
9. Terminada la prueba limpiar completamente el viscosímetro con varios enjuagues con un solvente apropiado, seguido por un solvente volátil.
10. Secar el tubo pasando una corriente lenta de aire seco y filtrando a través del capilar por 2 min.

Cálculos

Calcular la viscosidad cinemática usando la siguiente ecuación:

$$\text{Viscosidad Cinemática} = C(t)$$

Donde:

C= Constante de calibración del viscosímetro (mm²/s²)

T = tiempo de flujo en s.

3.4.2.3 ENSAYO DE PENETRACION ASTM D5³⁶

Equipo.

- Penetrómetro.- Permite sujetar la aguja y provisto de un dispositivo capaz de medir
- Aguja de penetración (Debe ser de acero inoxidable endurecido y templado, perfectamente pulida).
- Recipiente para muestras.
- Baño de agua.- un baño que tenga la capacidad mínima de 10 litros, que permita mantener una temperatura de 25 0.1 o cualquier otra temperatura de prueba con aproximación de 0.1°C
- Cronómetro.-Con aproximación de 0.1s o menos y precisión de 0.05% cuando se prueba a intervalos no menores de 15 min.
- Termómetro.- líquidos de vidrio calibrados de un rango aceptable y error máximo de medición de 0.1 °C (0.2 °F).



Figura 3.17 Equipo para la determinación de la penetración en laboratorio (ASTM D5)

Preparación de la muestra.

³⁶ ASTM D5 - 06e1 Método de prueba estándar para la penetración de materiales bituminosos.

Calentar la muestra con cuidado no más de 30 minutos para evitar burbujas de aire, hasta que esta llegue a ser fluida.

NOTA: muestras de brea de alquitrán se debe elevar la temperatura a no más de 60°C por encima del punto de ablandamiento (ASTM D 36), o no más de 90 °C si es un bitumen.

Rellenar los recipientes y cubrirlos para protegerlos del polvo, hasta que se enfríen a temperatura ambiente.

Procedimiento.

1. Se comprueba que el casquillo de la aguja este limpio y se deslice suavemente.
2. Limpiar la aguja de penetración con tolueno, secarla con un paño limpio e insertarla dentro del penetrómetro, si se especifica lo contrario, colocar los 50 gr. de peso por encima de la aguja, haciendo un peso total (100g).
3. El ensayo puede realizarse directamente en el baño de agua, colocando el penetrómetro sobre la plataforma y sobre la base del penetrómetro, el cual debe quedar perfectamente sumergido.
4. Se aproxima la aguja hasta que la punta toque la superficie de la muestra, sin que penetre. Esto se logra aproximando la punta de la guja y su imagen reflejada en la superficie de la muestra.
5. Colocar el dial del penetrómetro en cero y soltar el mecanismo que libera la aguja.
6. Leer y registrar la distancia de penetración, expresada en decimas de milímetros.
7. Realizar por lo menos tres penetraciones en puntos de la superficie de la muestra, a no menos de 10 mm de los bordes del recipiente y separados no más de 10 mm.

3.4.2.4 PUNTO DE INFLAMACION ASTM D 92³⁷

Introducción.

El punto de inflamación o punto de chispa, indica la temperatura a la que puede calentarse el material, sin peligro de inflamación en presencia de llama libre. Esta temperatura, usualmente, es muy inferior a aquella a la que el material ardería o

³⁷ ASTM D92 - 12 Método de prueba estándar para puntos de inflamación y fuego por Cleveland Open Cup Tester.

su punto de fuego. Por lo tanto, éste análisis sirve como prueba de seguridad en la operación de las plantas asfálticas en caliente. El punto de inflamación se mide por el ensayo en copa abierta Cleveland. La copa de bronce se llena parcialmente con el material y se calienta a una velocidad establecida. Se hace pasar periódicamente, sobre la superficie de la muestra, una pequeña llama, y se define como punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina. El punto de inflamación de los cutbacks se mide mediante el ensayo de punto de inflamación de vaso abierto, también, pero el aparato se modifica para hacer posible el calentamiento indirecto del cutback. A veces se emplea para los betunes asfálticos el punto de inflamación Pensky–Martens. Este difiere, esencialmente, de los otros por la necesidad de agitación durante el proceso.

Equipo:

- Termómetro.
- Aparato de copa abierta de Cleveland; consta de una copa de ensayo, plato calorífico y aplicador de llama de ensayo.



Figura 3.18 Equipo para determinación de punto de inflamación según cleveland copa abierta (ASTM D92)

Muestra de ensayo.

La obtención de la muestra se realiza de acuerdo con las instrucciones dadas en las normas ASTM: D 140 (muestreo de materiales bituminosos), D 4057 (muestreo

manual de petróleo y productos de petróleo), D4177 (muestreo automático de petróleo y productos de petróleo industriales) o E 300 (muestreo de químicos).

Procedimiento.

1. Llenar la copa con la muestra de ensayo hasta la marca de llenado, y colocarla en el centro del calentador.
2. Encender la llama y ajustarla a un diámetro de 3.2 mm a 4.8 mm (1/8 in a 3/16 in).
3. Aplicar calor inicialmente en una proporción tal que la temperatura se incremente de 14 °C a 17 °C (25°F a 30 °F) por minuto.
4. Cuando la temperatura de la muestra sea aproximadamente de 56 °C (100°F) por debajo del punto de manera que la proporción de aumento de temperatura, los últimos 28 °C (50°F) antes del punto de inflamación, sea de 5°C a 6°C (9°F a 11°F) por minuto.
5. Empezar a aplicar la llama de ensayo cuando la temperatura de la muestra este aproximadamente 28 °C por debajo del punto de inflamación y después por cada aumento de 2 °C (5°F).
6. Pasar la llama de ensayo por el centro de la copa, en ángulos rectos con el diámetro que pasa a través del termómetro, con un movimiento suave y continuo.
7. Registrar como punto de inflamación, la lectura de temperatura, al instante en que la llama de ensayo cause una llamarada en el interior de la copa.
8. Cuando el punto de inflamación es detectado en la primera aplicación de la llama de prueba, la prueba deberá ser descartada y proceder a iniciar una nueva prueba.
9. Para determinar el punto de combustión, continuar calentando la muestra luego de registrado el punto de inflamación de tal manera que la temperatura de la muestra se incremente en proporciones de 5 a 6 °C (9 a 11 °F) por minuto. Continuar la aplicación de la llama de ensayo a intervalos de 2 °C (5 °F) hasta que la muestra de ensayo se encienda y permanezca quemándose mínimo 5 s.
10. Registrar la temperatura de la muestra de ensayo cuando la llama de ensayo, que causó la ignición del espécimen fue aplicada.
11. Para determinar el punto de combustión, continuar calentando la muestra luego de registrado el punto de inflamación de tal manera que la temperatura de la muestra se incremente en proporciones de 5 a 6 °C (9 a 11 °F) por minuto. Continuar la aplicación de la llama de ensayo a intervalos

de 2 °C (5 °F) hasta que la muestra de ensayo se encienda y permanezca quemándose mínimo 5 s.

12. Registrar la temperatura de la muestra de ensayo cuando la llama de ensayo, que causó la ignición del espécimen fue aplicada.
13. Cuando los aparatos se enfríen a menos de 60° C (140°F) quitar la copa de los aparatos y limpiarlos como indica el fabricante.

Cálculos.

Registrar la presión barométrica del ambiente en el momento de ensayo. Si la presión difiere de 101.3 KPa ó 760 mmHg, corrija el punto de inflamación o punto de combustión como se indica a continuación:

- Punto de inflamación corregido: $C + 0.25 (101.3 - K)$
- Punto de inflamación corregido: $F + 0.06 (760 - P)$
- Punto de inflamación corregido: $C + 0.033 (760 - P)$

Donde:

C= Punto de inflamación observado ° C

F= Punto de inflamación observado °F

P= Presión barométrica del ambiente, mmHg.

K= Presión barométrica del ambiente, KPa.

Con el punto de inflamación y/o de combustión corregido, se redondean los valores con aproximación a 1 °C (2°F) y registrarlo.

3.5 DETERMINACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA.

3.5.1 METODO UCL.³⁸

3.5.1.1 DEFINICIÓN DEL METODO UCL.

El Método Universal de Caracterización de Ligantes® (Método UCL), se ha desarrollado para llevar a cabo la caracterización de los cementos asfálticos desde el punto de vista de su utilización en carreteras; esta evaluación está basada en la valorización de la cohesión, trabazón, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla asfáltica, antes los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico. Evaluando así la susceptibilidad térmica, la adherencia agregado pétreo-cemento asfáltico frente a la acción del agua y la resistencia al envejecimiento.

3.5.1.2 DESCRIPCIÓN DEL METODO UCL.

Este procedimiento fue desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña por los Dres. Félix Pérez Jiménez y Rodrigo Miró Ricasens, y en él se evalúan directamente las propiedades funcionales del cemento asfáltico a partir de la determinación de la cohesión que éste proporciona a una mezcla patrón abierta y cómo esta propiedad varía con la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento. Es una tecnología sencilla, de fácil ejecución y que ofrece un novedoso mecanismo de selección de cementos asfálticos que permiten:

- Diferenciar y valorar el comportamiento de los cementos asfálticos de similares características.
- Poner de manifiesto las diferencias de comportamiento de diversos cementos asfálticos modificados entre sí, y entre estos y los convencionales.

Por aplicarse a todo tipo de cemento asfáltico, modificados o no, se le dio al método el nombre de universal. El principio del mismo es comprar directamente las respuestas de los cementos asfálticos estudiados, poniendo de manifiesto sus diferencias relativas y las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

³⁸ ASIDUIDAD DEL METODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACION LIGANTE, EN (METODO UCL) PARA LA SELECCIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO EN MEZCLAS ASFALTICAS DE ALTO MODULO.

3.5.1.3 PROCEDIMIENTO DEL METODO UCL.

El método consiste en fabricar probetas con una mezcla patrón de granulometría abierta, sin filler ni finos, con unos agregados pétreos tipo, con la cual se elaboran probetas Marshall que, sometidas a diferentes condiciones (en seco, tras inmersión, a distintas temperaturas y períodos de envejecimiento), son evaluadas mediante el ensayo Cántabro, luego de ser sometida a diferentes procesos de condicionamiento, definidos éstos, en función del tipo de propiedad a estudiar, tenemos:

- La cohesión se valora con el ensayo Cántabro (en seco y a 25°C de temperatura).
- La susceptibilidad térmica analiza a partir de las curvas de estado, que se obtienen realizando el ensayo Cántabro variando la temperatura de las probetas; para ello, previo al ensayo, se mantiene 24 horas a la temperatura de 25°C, con la cual ingresarán al tambor de la máquina de Los Ángeles. De tal forma, se analizara el comportamiento mecánico del cemento asfáltico observado cómo va evolucionando el poder aglomerante del mismo a bajas y altas temperaturas.
- La adhesividad se valora con la pérdida de la resistencia a la abrasión de la probeta mediante el ensayo Cántabro tras inmersión a unas temperaturas de 35°C y 60°C.
- Para evaluar el envejecimiento, el método prevé el análisis del cemento asfáltico en película fina directamente sobre el agregado pétreo al utilizar probetas con altos contenidos de vacíos, las cuales se someten a distintos períodos de envejecimiento a una temperatura de 60°C y 163°C y se ensayaran luego siguiendo el procedimiento estipulado por el ensayo Cántabro.

El ensayo Cántabro de pérdida por desgaste puede ser empleado para diseño o control de mezclas abiertas en caliente. Consiste en someter una probeta Marshall a la acción de desgaste en la máquina de Los Ángeles, sin ningún tipo de la carga abrasiva. Esta probeta está compuesta por 1000 grs. de agregados pétreos de trituración y porcentaje de cemento asfáltico variables de 4,5% sobre los agregados pétreos, sin finos ni filler.

Con esta mezcla, se procedió con la fabricación del moldeo de las probetas, basándonos en la fórmula de trabajo y de los procedimientos de control para la elaboración de las briquetas del ensayo Marshall, respectándose el criterio de equiviscosidad de los cementos asfálticos para la determinación de la temperatura

de mezcla y de compactación. Por lo tanto, se procedió con la compactación de la probeta con 50 golpes por cada cara, posteriormente se somete a un proceso de acondicionamiento, dependiendo de la propiedad a evaluar; finalmente se lleva al ensayo de desgaste. Durante el ensayo se va desprendiendo por impacto y abrasión los agregados pétreos más superficiales de la probeta, determinándose tras un número de revoluciones (100, 200 y 300), la pérdida de peso de la probeta referida, en tanto por ciento, al peso inicial:

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

De donde:

P_c : Pérdida al Cántabro

P_i : Peso inicial en gramos.

P_f : Peso final en gramos.

El ensayo Cántabro, por ser un ensayo experimental, no determina ningún parámetro fundamental de la mezcla, como podría ser el módulo dinámico, etc., pero si da una idea clara de la capacidad del cemento asfáltico para mantener unidos los agregados pétreos de la mezcla, produciéndose bajas pérdidas cuando estas uniones son dúctiles y tenaces situación que ocurre en temperaturas medias, y altas pérdidas cuando el cemento asfáltico se torna frágil por la baja temperatura o cuando se reblandece demasiado en las altas.

3.5.1.4 CRITERIOS DE CLASIFICACION DEL METODO UCL.

El método propone un criterio de clasificación de cemento asfáltico basado en el análisis de las curvas de estado en función de las pérdidas que definen su fragilidad a bajas temperaturas y su inconsistencia a altas temperaturas. Así, para el estudio de susceptibilidad térmica en las mezclas patrón del método UCL los límites son:

- Temperatura de fragilidad, cuando las pérdidas a bajas temperaturas alcanzan el 60%.
- Temperatura de inconsistencia, cuando las pérdidas a altas temperaturas alcanzan el 70%.

El “Cántabro Seco” y “Cántabro Húmedo” NLT/362-92, este último evalúa la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua sobre la mezcla

drenantes sometiendo a las probetas a un baño de agua a 60°C durante 24 horas y a continuación 24 horas al aire a 25°C antes de ensayarlas. Las pérdidas deben ser inferiores al 35%.

Estos dos valores sirven para comparar el rango o definir el intervalo de temperatura en que los cementos asfálticos mantienen propiedades de flexibilidad y consistencia.

3.5.2 PREPARACIÓN Y FABRICACIÓN DE BRIQUETAS MARSHALL PARA EL ENSAYO CÁNTABRO.

3.5.2.1 DETERMINACION DE LA METODOLOGIA A UTILIZAR PARA LLEVAR A CABO LA FABRICACION DE BRIQUETAS.

Previo a iniciar la etapa de fabricación de briquetas es importante identificar el tipo de cemento asfáltico que se va a analizar, el número de briquetas que se van a fabricar, la temperatura de ensayo a la cual las briquetas se van a envejecer y de igual forma el tiempo de envejecimiento que tendrá las briquetas en el horno.

TEMPERATURAS DE ENSAYO.

La temperatura de ensayo a la cual se someterán las briquetas fue determinada del resultado del trabajo de campo donde se estableció mediante el método directo la temperatura a la cual el cemento asfáltico trabaja en las zonas de medición del territorio nacional, (ver resultados de temperatura tabla 3.2).

En la tabla 3.4 se muestra el rango de temperaturas que se obtuvieron producto de la investigación.

Criterios de clasificación.	Clasificación de las temperaturas obtenidas en campo por rangos.		
	Fría.	Templada.	Cálida.
	$T < 50^{\circ}\text{C}$	$50^{\circ}\text{C} \leq T \leq 60^{\circ}\text{C}$	$T > 60^{\circ}\text{C}$
Promedios de resultados:	44.00°C	55.58°C	63.30°C
Temperatura de ensayo según rangos:	25°C	55°C	75°C

Tabla 3.4 Rango de temperaturas para el ensayo Cántabro para la determinación de la Susceptibilidad térmica.

CEMENTO ASFALTICO A EMPLEAR:

En El salvador la mayor parte de carreteras que forman la red vial están hechas de concreto asfaltico y el asfalto empleado para su fabricación comúnmente es AC-20 y AC-30, es por ello que se estableció que para el desarrollo del presente trabajo de grado se emplearían estos dos tipos de cemento asfaltico a los cuales se les analizara su SUSCEPTIBILIDAD TERMICA mas el asfalto MODIFICADO TIPO E3 el cual se plantío su utilización producto de la investigación de campo de las temperaturas de los pavimentos asfalticos a 2.0 cm de profundidad, dicha investigación arrojó resultados de temperaturas a horas criticas de entre 40°C y 70°C (ver resultados de temperatura tabla 3.2), estas temperaturas son consideradas elevadas y el asfalto MODIFICADO TIPO E3 trabaja mejor a temperaturas elevadas.

Cemento asfaltico a emplear:

- AC-20
- AC-30
- MODIFICADO TIPO E3

DETERMINACION DEL NÚMERO DE BRIQUETAS A FABRICAR:

Para poder determinar el número de briquetas a fabricar se tomo en cuenta primero el numero de zonas políticas en las cuales se divide El Salvador las cuales son 3 zonas, segundo el numero y tipos de cemento asfaltico que se va a estudiar, 3 tipos de cemento asfaltico: AC-20, AC-30 y MODIFICADO TIPO E3, tercero los rangos de temperatura a los cuales se envejecerán las briquetas para su análisis (25°C , 55°C y 75°C) y cuarto tenemos los números de revoluciones que el método Cántabro exige para determinar la susceptibilidad térmica de los asfaltos, las revoluciones que exige el método son 3 (100rev, 200rev y 300rev), lo descrito anteriormente se puede ver mejor en la tabla 3.5.

METODO DE DETERMINACION DE EL NÚMERO DE BRIQUETAS A FABRICAR.				
Numero de zonas de estudio.	Numero de tipos de cemento asfaltico a estudiar.	Numero de temperaturas a las cuales se ensayaran las briquetas.	Numero de revoluciones que establece el método Cántabro.	Numero de briquetas a fabricar para la investigación.
3	3	3	3	81

Tabla 3.5 Muestra la forma en la cual se determino el número de briquetas a elaborar en las instalaciones de ASFALCA.

3.5.2.2 PREPARACION DE LA GRANULOMETRIA.³⁹

En las diferentes investigaciones realizadas a nivel mundial se han utilizado dos tipos de granulometrías abiertas de diferente tamaño máximo, de las cuales se llegó a unas mezclas patrones para la aplicación del método UCL[®], tal como se indica en la Tabla 3.6.

Tamices UNE (mm)	Porcentaje pasa	
	T - 10	T - 12
12,5	100	100
10,0	82	100
5,0	38	100
2,5	6	80
0,63	0	0

Tabla 3.6: Granulometría abierta empleadas por el método UCL[®]

Estas granulometrías T -10 y T-12 son utilizadas en el método UCL[®], el cual se apoya en el Cántabro, y están concebidas para que sean de fácil agresión por el agua y demás factores que propician el deterioro de la mezcla, no tiene que ver con lo que luego se diseñe en una aplicación específica, pues lo que se pretende es estudiar si los materiales pueden soportar la agresión del medio. La mezcla patrón se fabrica a partir de unos agregados pétreos sanos y limpios, con un desgaste de Los Ángeles inferior a 25%.

De estas dos granulometrías se recomienda la T-10 por ser la de menores dispersiones en el ensayo Cántabro, y a su vez proporciona un mayor porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica, del orden de los $27 \pm 1\%$, lo que facilita la circulación del aire por la probeta en el ensayo de oxidación. Por lo tanto, las mezclas obtenidas son del tipo abierta.

CARACTERÍSTICAS DE AGREGADOS PÉTREOS EMPLEADO.

En primer lugar se empleo la siguiente granulometría (T-10), Tabla 3.6. La curva granulométrica seleccionada se puede observar en la Figura 3.18, esta granulometría no tiene prácticamente finos ya que únicamente un 6% pasa el

³⁹ ASIDUIDAD DEL METODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACION LIGANTE, EN (METODO UCL) PARA LA SELECCIÓN DEL CEMENTO ASFALTICO EN MEZCLAS ASFALTICAS DE ALTO MODULO.

tamiz 2,5 UNE y el tamiz 0,63 retiene todo el agregado pétreo. Es de notar que esta granulometría se mantendrá constante durante el estudio, para así poder llevar a cabo la evaluación del cemento asfáltico.

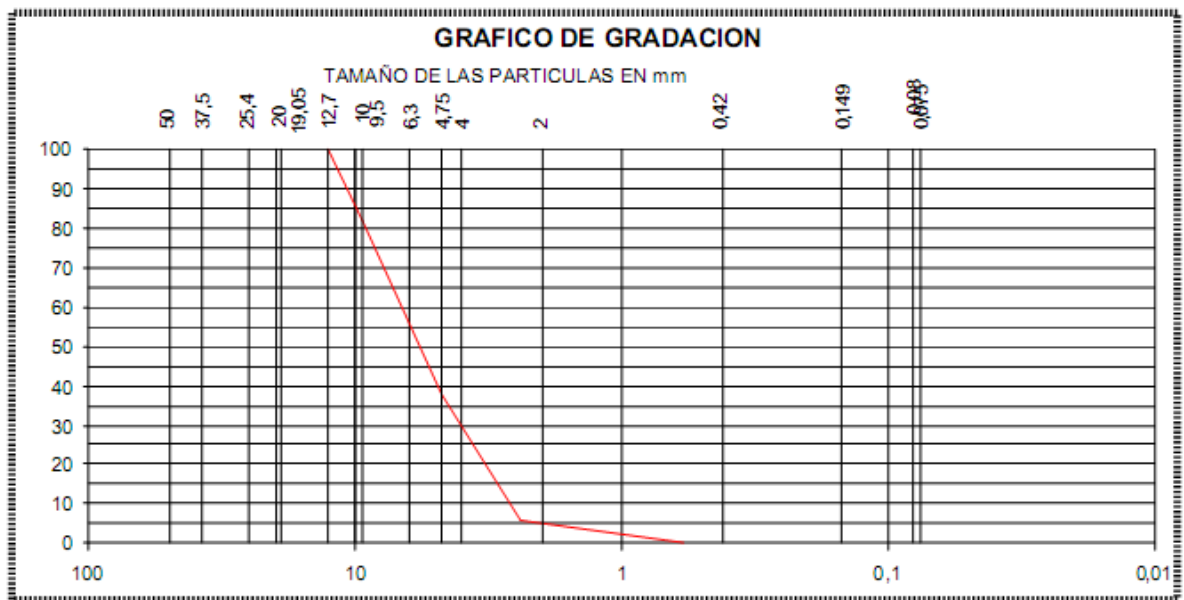


Figura 3.19 Curva granulométrica seleccionada

TAMIZ UNE (mm)	% PASA	% RETENIDO	PESO MATERIAL POR PROBETA (grs)
12,5	100	0	0
9,5	82	18	180
5,0	38	44	440
2,5	6	32	320
0,63	0	6	60

Tabla 3.7. Granulometría empleada para la elaboración de briquetas MARSHALL.

Una vez determinado el tipo de granulometría utilizar (T-10) para la elaboración de cada briqueta, se procede a tamizar los agregados pétreos y pesado de los

mismos, la figura 3.20 muestra el proceso llevado a cabo por el grupo investigador.



Figura 3.20 Tamizado de los agregados pétreos para conseguir la granulometría T-10

El agregado pétreo empleado para la granulometría en la elaboración de las briquetas fue obtenido de La Cantera de San Diego S.A. de C.V. ubicada en San Diego municipio de La libertad.

3.5.2.3 **ELABORACIÓN DE LA MEZCLA⁴⁰.**

1. Para iniciar con la elaboración de la mezcla que servirá para fabricar una briqueta se procede a realizar el proceso de pesado de la tara, recipiente donde se realizara el mezclado de los materiales, la tara debe estar referenciada con números para evitar confundirlas con otras taras durante todo el proceso y de igual forma debe estar limpia y en buenas condiciones.

Se anota el dato en bitácora con la siguiente nomenclatura:

$$W_{tara}$$

⁴⁰ Norma NLT 159/63 "METODO MARSHALL PARA MEZCLAS ASFALTICAS".

2. Sin quitar la tara de la bascula se procede a destarar, elimina el dato en pantalla de la bascula y la prepara para realizar un nuevo pesado, Se agrega la granulometría con la que se elaborara la briqueta sobre la tara para su pesado.

Se anota el dato en bitácora con la siguiente nomenclatura:

$$W_{\text{agregado humedo}}$$

3. Se procede a calentar la tara junto con la granulometría en la estufa a una temperatura comprendida entre 175°C y 190°C durante un periodo de tiempo de 1 hora.
4. Calentar el asfalto a modo de que se mantenga en el intervalo de temperatura de entre 145°C y 160°C, el calentamiento del asfalto debe comenzar por lo menos 15min antes de cumplir la hora de calentado del agregado, es importante no exceder la temperatura del asfalto ya que se corre el riesgo de que este pierda parte de sus propiedades, para ello se empleo un termómetro digital con el cual se chequeo constantemente la temperatura.
5. Una vez cumplida la hora de secado del agregado en la estufa se procede a sacar el agregado para volverlo a pesar y así poder determinar el peso seco del agregado mas la tara.

Se anota el dato en bitácora con la siguiente nomenclatura:

$$W_{\text{seco+tara}}$$

6. Se procede a restar el peso de la tara al peso anterior para obtener solamente el peso seco.

Se anota el dato en bitácora con la siguiente nomenclatura:

$$W_{\text{seco}}$$

7. El porcentaje de asfalto con el que se fabricaran las 81 briquetas es de 4.5% el peso del agregado, el porcentaje de asfalto se mantendrá de forma constante para todas las briquetas y para todos los tipos de asfalto con los que se va a trabajar.

Se emplea la siguiente fórmula para determinar el peso del asfalto que será vertido sobre la granulometría.

$$W_{asfalto} = 4.5\% (W_{seco}) \quad (1)$$

8. Se suma el peso del asfalto al peso de la granulometría mas la tara teniendo de esta forma el peso al cual se llegara cuando se comience a verter el asfalto sobre el agregado.

$$W_{total} = W_{seco+tara} + W_{asfalto} \quad (2)$$

9. Se procede a verter el asfalto sobre el agregado hasta alcanzar el peso descrito por la formula numero 2.
10. Llevar la mezcla a la estufa para calentarla y así facilitar su mezclado, la mezcla debe estar a una temperatura de entre 145°C y 160°C previo a vertido a los moldes MARSHALL.



Figura 3.21 muestra la bascula digital empleada para realizar el proceso de mezclado en el momento de pesado de una tara.

El procedimiento para la elaboración de la mezcla descrito anteriormente fue desarrollado bajo la norma NLT 159/63 “METODO MARSHALL PARA MEZCLAS ASFALTICAS”.

3.5.2.4 ELABORACION DE LAS BRIQUETAS CILINDRICAS TIPO MARSHALL⁴¹.

Las briquetas de ensayo se fabrican siguiendo el procedimiento dado en la norma **ASTM D-1559** “Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas compactadas”. Las briquetas se compactan con un número de 50

⁴¹ norma ASTM D-1559 “Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas compactadas”.

golpes por cara con un martillo mecánico normalizado, ver figura 3.22, y con una temperatura de compactación correspondiente a 2.8 poises de viscosidad. El numero de briquetas fabricadas es de ochenta y uno, veintisiete por cada tipo de ligante (AC-20, AC-30 y MODIFICADO TIPO E3).



Figura 3.22 Martillo mecánico normalizado, la figura de la izquierda muestra la maquina que hace funcionar al martillo que se muestra en la figura de la derecha.

Con la mezcla a temperatura de compactación, se dispone a colocarla en un molde Marshall con dimensiones mostradas en la figura 3.23, esto según la norma NLT 159. El molde debe de estar previamente calentado y en el fondo del molde debe encontrarse un papel parafinado que evitará que la mezcla se pegue a él y al martillo compactador en el proceso, para el reacomodo del agregado colocado en el molde se emplea el método de varillado, la varilla debe ser previamente calentada para evitar que la mezcla asfáltica se adhiera a ella, para el varillado se dan un numero de 25 golpes distribuyéndolos desde el centro hasta las orillas del molde.

La mezcla asfáltica es colocada de tal manera que el material fino se encuentre en ambas caras de la briqueta para proporcionar un buen acabado.

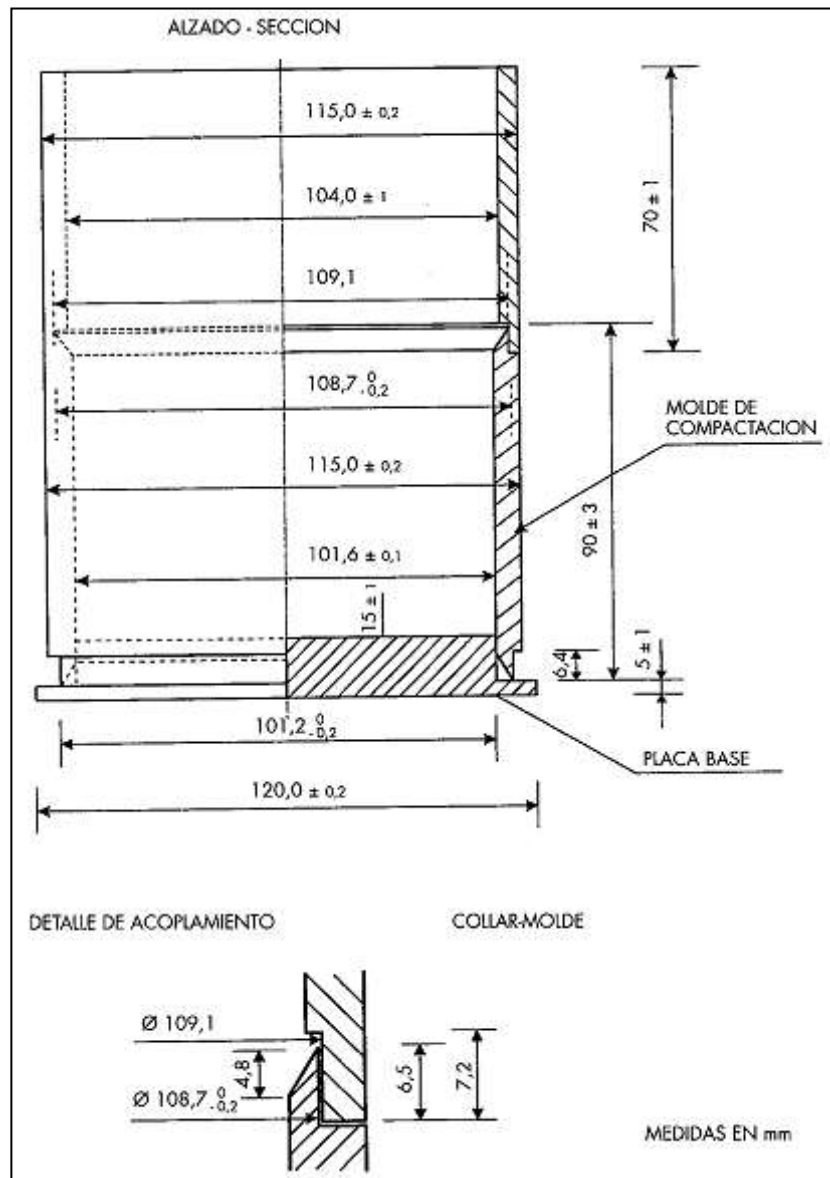


Figura 3.23 Conjunto de compactación.⁴²

Una vez colocada la mezcla en el molde se procede a realizar la etapa de compactación y creación de la briqueta, para la compactación es utilizado un martillo Marshall formado por una masa de compactación de 3.96 ± 20 g de masa y un pisón de 4.55 ± 20 g montado de forma que se pueda conseguir una caída libre del mismo sobre la base desde una altura de 460 ± 3 mm. Según la

⁴² NLT 159 "Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall".

norma NLT 159, el martillo compactador debe tener las dimensiones mostradas en la figura 3.24.

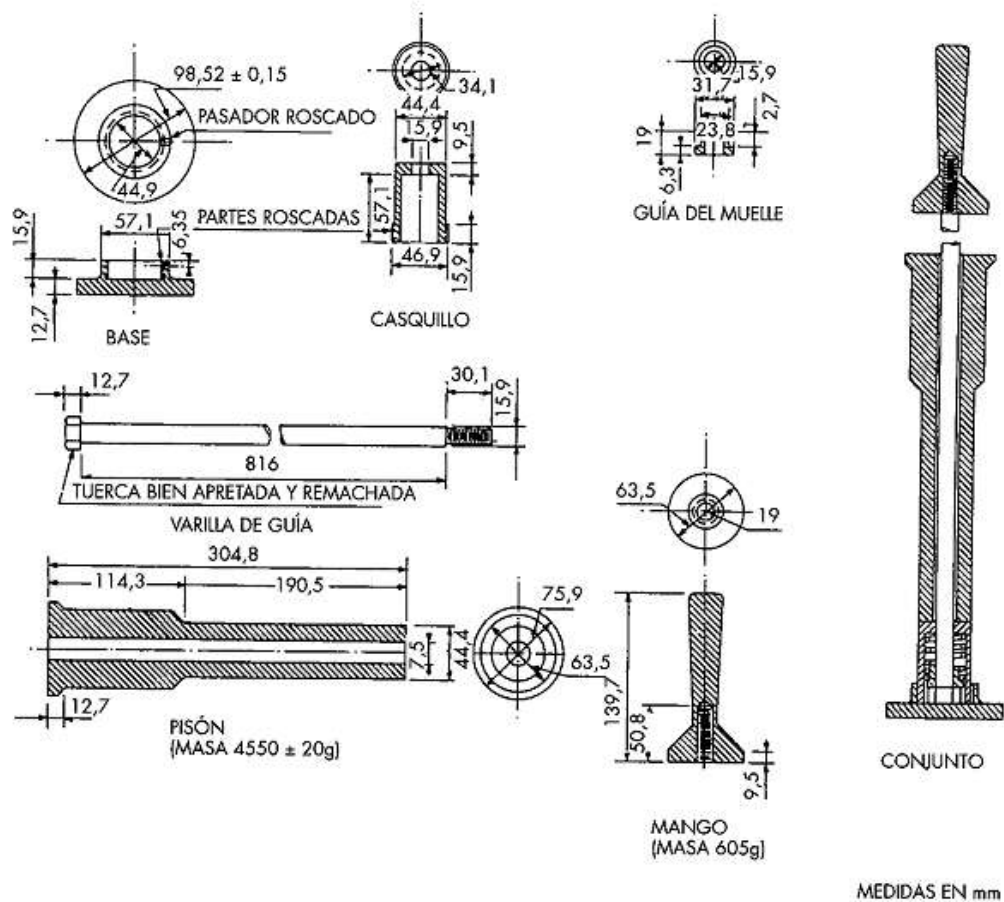


Figura 3.24. Maza de compactación para el aparato Marshall.⁴³

Basados en la norma NLT 352 “Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste”, la energía de compactación será de 50 golpes por cada cara empleando el equipo y procedimiento de compactación descritos anteriormente.

Inmediatamente después de compactada la briqueta, debe ser removida el papel parafinado, y se espera un tiempo mínimo de 2 horas antes de extraerla del

⁴³ NLT 159 “Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall”.

molde, la figura 3.25 muestra una serie de briquetas ya compactadas y en proceso de enfriado.



Figura 3.25 Briquetas cilíndricas tipo Marshall en proceso de enfriado después de compactadas.

Una vez las briquetas pasan el periodo de tiempo de 2 hora a temperatura ambiente para alcanzar su enfriamiento se procede a desmoldarlas empleando una prensa hidráulica tal como lo muestra la figura 3.26.



Figura 3.26 Proceso de desmoldado de una briqueta.

Luego de desmoldado se procede al etiquetado y almacenado de las briquetas, las briquetas son etiquetadas con el tipo de asfalto con el cual fueron creadas, la fecha de elaboración e identificación del trabajo de investigación para evitar generar confusiones ya sea con otros grupos de tesis o el personal técnico que labora en las instalaciones del laboratorio.



Figura 3.27 Briquetas fabricadas del tipo de asfalto AC-30 ya desmoldadas y etiquetadas.

3.5.2.5 PROCESO DE CURADO O ENVEJECIMIENTO DE BRIQUETAS.

Luego de haber fabricado las ochenta y uno briquetas, veintisiete por cada tipo de asfalto (AC-20, AC-30 y MODIFICADO TIPO E3), se procede a la etapa de curado la cual es necesaria para realizar el ensayo de la susceptibilidad térmica tal como lo indica el método descrito en el apartado 3.5.1.3 PROCEDIMIENTO DEL METODO UCL.

Por cada tipo de asfalto se crearon 27 briquetas de las cuales se formaron tres grupos de 9 y se procedió a curarlas a distintas temperaturas (25°C, 55°C y 75°C) según lo establecido anteriormente en la tabla 3.4, el tiempo de curado por cada grupo de briquetas fue de 15 horas, la tabla 3.8 muestra la información empleada para el curado de las briquetas.

Dado a la constante y elevada temperatura a que se sometieron las briquetas (55°C y 75°C) podría producirse un efecto de desmoronamiento de las mismas en el interior del horno o al momento de manipularlas después de cumplido el tiempo de curado (15 horas), haciendo que sea imposible proceder a su ensayo. Por ello, se creó un dispositivo para confinar las briquetas mediante el empleo de una malla metálica y alambre de amarre el cual permitía fijar la malla a cada

briqueta generando estabilidad para cada una de ellas, la figura 3.28 muestra a las briquetas aseguradas previo a someterlas al curado en el horno.

Tipos de asfalto.	Numero de briquetas por cada tipo de asfalto.	Temperatura de envejecimiento o curado ° C.	Tiempo de curado (horas)	Intervalo de tiempo en el cual se realizo el curado.
AC-20.	9	25	15	05:00pm - 08:00am
	9	55	15	05:00pm - 08:00am
	9	75	15	05:00pm - 08:00am
AC-30.	9	25	15	05:00pm - 08:00am
	9	55	15	05:00pm - 08:00am
	9	75	15	05:00pm - 08:00am
MODIFICADO TIPO E3.	9	25	15	05:00pm - 08:00am
	9	55	15	05:00pm - 08:00am
	9	75	15	05:00pm - 08:00am

Tabla 3.8. Muestra la información empleada para el proceso de curado.



Figura 3.28 Dispositivo estabilizador de briquetas empleado para evitar el desmoronamiento y la pérdida de la forma cilíndrica producto de las altas temperaturas a las que se sometieron.

Una vez finalizado el curado de las briquetas se procede a enfriarlas por un tiempo mínimo de 6 horas para luego ser ensayadas según lo especificado en el método cántabro.

3.5.2.6 ENSAYO CANTABRO EN SECO PARA LA DETERMINACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA.

Consiste en someter al desgaste cada briketa a 100, 200 y 300 revoluciones en la máquina de Los Ángeles (sin carga abrasiva), previo a mantenerlas a 25 ° C o temperatura ambiente durante un período mínimo de 6 horas después de finalizado el proceso de curado de cada una, cada briketa será ingresada al tambor de la máquina de Los Ángeles de forma individual. De tal forma, se analizara el comportamiento mecánico del cemento asfáltico observando cómo va evolucionando el poder aglomerante del mismo a bajas y altas temperaturas; según la norma NLT-352 “*Caracterización de mezclas bituminosas abiertas por medio del Ensayo Cántabro de pérdida por desgaste*”, determinándose tras cada número de revoluciones especificado (100, 200 y 300), la pérdida de peso de la briketa referida, en tanto por ciento, al peso inicial.

La Máquina de los Ángeles debe cumplir con las especificaciones que la norma ASTM C-131 “*Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación de pequeño tamaño agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles*”, establece, la figura 3.30 presenta las dimensiones que debe poseer dicha maquina y en la figura 3.31 se muestra la maquina empleada para el ensayo.

El procedimiento seguido en el laboratorio según la norma NLT 352 es el siguiente: se toma una briketa y se procede a determinar su peso, anotando en bitácora como peso inicial **Wi**. La figura 3.29 muestra la etapa de medición del peso de una de las briquetas de asfalto modificado tipo e3 (AM –T 3).



Figura 3.29 briketa siendo pesada en vascula digital antes de ser sometida al ensayo cantabro.

A continuación del tiempo de enfriado, se introduce una briqueta en el tambor de la Máquina de Los Ángeles, y sin la carga abrasiva de las bolas, se hace girar el tambor a la misma velocidad normalizada en la ASTM C-131 de 3.1 a 3.5 rad/seg (30 a 33 rpm), durante 100 vueltas.

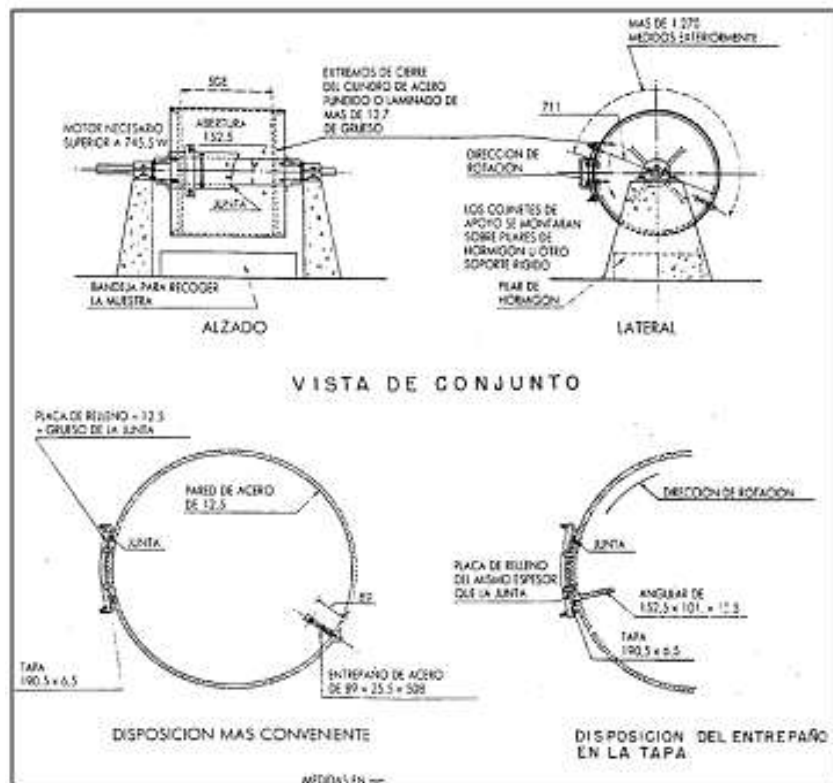


Figura 3.30 Máquina de Los Angeles⁴⁴.

Se saca la briqueta y se toma su peso, anotándolo en bitácora como $W_f(100)$, se devuelve al tambor de la Máquina de Los Ángeles, y se repite el procedimiento hasta alcanzar las 200 y 300 revoluciones en el contador. Estos pesos son anotados como $W_f(200)$ y $W_f(300)$. El ensayo se repite para cada una de las ochenta y uno briquetas preparadas para la prueba. La figura 3.31 muestra el proceso de pesado y de desgaste de las briquetas según el número de revoluciones efectuadas.

⁴⁴ Norma NLT 149/72 RESISTENCIA AL DESGASTE DE LOS ARIDOS POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES.



a) Briqueta sometida a 100 revoluciones



b) Briqueta sometida a 200 revoluciones



c) Briqueta sometida a 300 revoluciones



d) Maquina de los Angeles.

Figura 3.31 Se muestran las etapas de pesado de briquetas según el número de revoluciones a) Briqueta previamente sometida al proceso de desgaste con 100 revoluciones en la Maquina de los Angeles b) Briqueta sometida al proceso de desgaste de 200 revoluciones c) Briqueta sometida al proceso de desgaste de 300 revoluciones d) Maquina de los Angeles utilizada para el ensayo cántabro.

Se calcula el resultado de la pérdida por desgaste para cada briqueta a 100, 200 y 300 revoluciones, mediante la siguiente expresión:

$$W_c = \frac{W_i - W_f}{W_f} \times 100$$

De donde:

W_c : Pérdida al Cántabro

W_i : Peso inicial en gramos.

W_f : Peso final en gramos.

Los resultados obtenidos de las masas de las ochenta y una briquetas se presentan en la tabla 3.9. La información de las pérdidas al cántabro obtenidas mediante la fórmula para cada uno de los tipos de ligante ensayados aparecen en la tabla 3.10.

El análisis a los resultados obtenidos en el laboratorio se realiza en la siguiente sección.

3.5.3 PRESENTACION DE RESULTADOS DEL ENSAYO CANTABRO.

RESULTADOS DE LOS PESOS OBTENIDOS DEL ENSAYO CANTABRO PARA LA DETERMINACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD TERMICA DE LOS ASFALTOS.													
Numero de briquetas	AC-30				AC-20				MODIFICADO TIPO E3				Temperatura de ensayo.
	Winicial (gr)	Wfinal (gr)			Winicial (gr)	Wfinal (gr)			Winicial (gr)	Wfinal (gr)			
		100	200	300		100	200	300		100	200	300	
1	1010.4	993.2	950	920	1015.4	996.5	920	855.7	1019.6	996.2	953.2	927.1	25°C
2	1021.1	995.9	935.1	915.6	1023.1	969	925	869	1016.1	1001	987.6	960.5	
3	1025.9	998.3	940.5	905.3	996.2	935	890	828.9	1018.8	1004	993.4	946.1	
4	1017.6	996.8	955.3	911.2	960.7	923.3	907.4	895.3	1022	1007	988.6	955.6	
5	1013	997.3	935.8	910.5	990.1	984.7	971.2	948.2	1019.2	1004	987.8	931.3	
6	1010.6	993.4	957.2	918.4	1017	954.5	884.6	867.7	1016	1001	983.7	953.4	
7	1029.5	996.8	923.8	830.6	1030.6	964.5	918.7	866.5	1003.4	981.4	956.9	921.1	
8	1016.7	990.2	956.7	890.2	1019.1	967.4	922.6	885.2	1014.3	994.2	942.8	909.8	
9	1015.8	994.6	948.3	891.7	1022.1	985.6	972.1	945.6	1018	1006	980.9	942.7	
1	1007.2	982.3	910.3	860.1	1016	948.6	909.1	889.2	1014.6	988.5	948.8	895.6	55°C
2	1015.4	975.3	914.8	881.6	1015.1	943.2	901.8	844.8	1012.7	981.3	951.4	899.6	
3	1016.3	987.7	909.2	872.8	1027.3	950.9	930.1	850	1015.4	975.7	933.7	854.6	
4	1014	960.2	940.4	864.1	1016.1	975.1	907.5	845.4	1014.3	986.9	939.4	903.1	
5	1013.1	990.3	935.4	875.6	1004	955.9	896.2	838.3	1000.5	977.4	927.3	885.9	
6	1006.3	965.4	905.4	830.2	1021	935.6	880.2	811.3	1013.4	981.3	938.1	898.9	
7	987.2	943.4	820.3	803.9	1007	909.3	880	819	1019.6	978.8	931.4	860.8	
8	1009.5	985.6	924.1	865.9	1006.2	923.6	908.4	845.2	1013.7	974.8	928.7	887.3	
9	1015.4	970.1	907.9	844.7	995.3	870.1	817.1	784.3	1015.4	990.9	911.9	841.8	
1	1019.2	921.4	840.4	731.2	1013.4	879.6	804.9	611.6	1018.8	921.4	841.3	781.9	75°C
2	1021.6	928.2	844.9	726.1	995.4	886.4	796.2	642.8	1016.4	948.5	825.6	756.7	
3	1013.4	936.4	853.6	654.2	1004.1	892.6	763.4	635.7	1017.9	960.9	814.9	742.8	
4	1012.5	913.7	861.4	721.2	1019.3	905.4	897.6	706.3	1021.7	952.3	866.7	798.4	
5	1007.6	920.3	858.5	643.9	1023.7	918.5	831.8	723.4	1020.6	954.4	878.2	715.8	
6	997.8	915.4	847.6	735.7	1009.9	911.6	840.9	686.9	1015.4	913.1	864.4	528.7	
7	1013.4	924.5	838.7	688.6	992.6	878.4	832.2	624.6	1012.5	887.7	875.8	801.9	
8	1008.6	933.6	841.3	729.4	922.4	833.5	750.6	654.9	1019.8	956.5	832.1	779.3	
9	1020.6	928.4	826.1	706.8	1014.8	850.3	793.5	659.2	1021.7	913.8	859.9	769.6	

Tabla 3.9 Muestra los resultados obtenidos de las masas de todas las briquetas sometidas al ensayo cántabro.

A continuación se muestran los porcentajes de pérdidas al cántabro (w_c) determinados por la tabla 3.9 y la expresión siguiente:

$$W_c = \frac{W_i - W_f}{W_f} \times 100$$

PORCENTAJES DE PERDIDAS AL CANTABRO										
Numero de briquetas	AC-30			AC-20			MODIFICADO TIPO E3			Temperatura de ensayo.
	100 Rev	200 Rev	300 Rev	100 Rev	200 Rev	300 Rev	100 Rev	200 Rev	300 Rev	
1	1.732	6.358	9.826	1.897	10.37	18.663	2.349	6.966	9.977	25°C
2	2.53	9.197	11.522	5.583	10.605	17.733	1.448	2.886	5.789	
3	2.765	9.08	13.322	6.545	11.933	20.183	1.403	2.557	7.684	
4	2.087	6.522	11.677	4.051	5.874	7.305	1.419	3.379	6.949	
5	1.574	8.25	11.258	0.548	1.946	4.419	1.443	3.179	9.438	
6	1.731	5.579	10.039	6.548	14.967	17.206	1.407	3.284	6.566	
7	3.28	11.442	23.947	6.853	12.18	18.938	2.242	4.859	8.935	
8	2.676	6.272	14.21	5.344	10.46	15.127	2.022	7.584	11.486	
9	2.132	7.118	13.917	3.703	5.144	8.09	1.122	3.782	7.988	
Promedio	2.279	7.758	13.302	4.564	9.275	14.185	1.651	4.275	8.312	
1	2.535	10.645	17.103	7.105	11.759	14.26	2.64	6.935	13.287	55°C
2	4.112	10.997	15.177	7.623	12.564	20.159	3.2	6.443	12.572	
3	2.896	11.78	16.441	8.034	10.45	20.859	4.069	8.75	18.816	
4	5.603	7.826	17.348	4.205	11.967	20.192	2.776	7.973	12.313	
5	2.302	8.307	15.704	5.032	12.029	19.766	2.363	7.894	12.936	
6	4.237	11.144	21.212	9.128	15.996	25.847	3.271	8.027	12.738	
7	4.643	20.346	22.801	10.745	14.432	22.955	4.168	9.47	18.448	
8	2.425	9.241	16.584	8.943	10.766	19.049	3.991	9.153	14.245	
9	4.67	11.841	20.208	14.389	21.809	26.903	2.472	11.35	20.622	
Promedio	3.714	11.347	18.064	8.356	13.53	21.11	3.217	8.444	15.109	
1	10.614	21.276	39.387	15.211	25.904	65.697	10.571	21.098	30.298	75°C
2	10.062	20.914	40.697	12.297	25.019	54.854	7.159	23.11	34.32	
3	8.223	18.721	54.907	12.492	31.53	57.952	5.932	24.911	37.036	
4	10.813	17.541	40.391	12.58	13.558	44.315	7.288	17.884	27.968	
5	9.486	17.368	56.484	11.453	23.07	41.512	6.936	16.215	42.582	
6	9.002	17.721	35.626	10.783	20.098	47.023	11.204	17.469	92.056	
7	9.616	20.83	47.168	13.001	19.274	58.918	14.059	15.609	26.263	
8	8.033	19.886	38.278	10.666	22.888	40.846	6.618	22.557	30.861	
9	9.931	23.544	44.397	19.346	27.889	53.944	11.808	18.816	32.757	
Promedio	9.531	19.756	44.148	13.092	23.248	51.673	9.064	19.741	39.349	

Tabla 3.10. Muestra los resultados obtenidos de las pérdidas por desgaste obtenidas por cada tipo de asfalto.

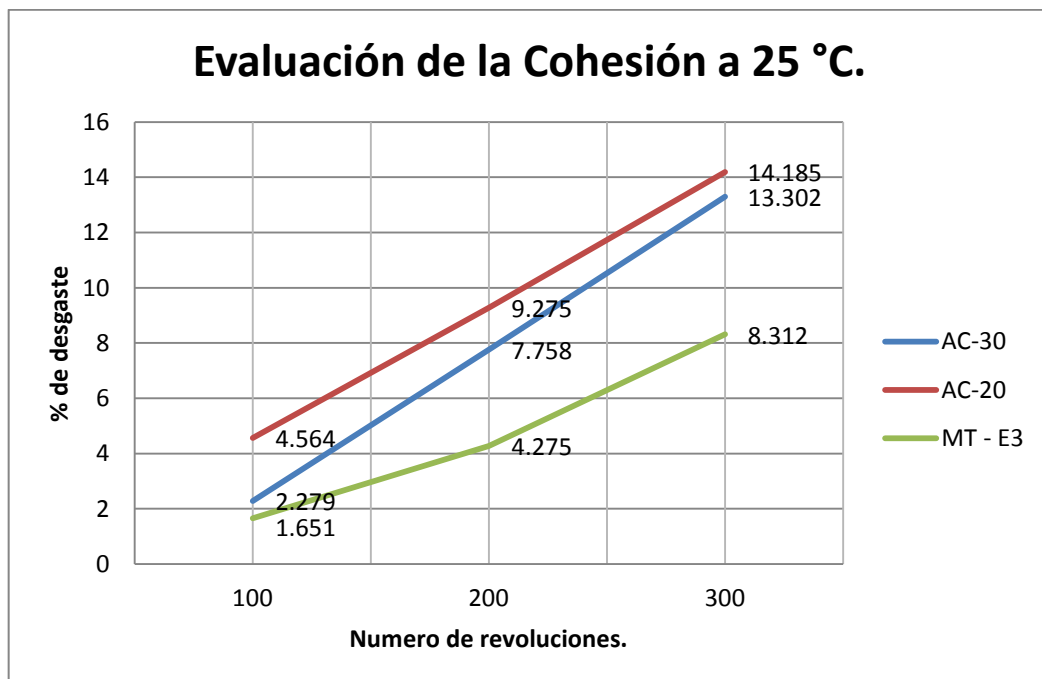
3.5.3.1 ANALISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO CANTABRO.

COHESION.

La tabla 3.11 muestra el promedio de los valores de los porcentajes de desgaste de la tabla 3.10 para la temperatura de 25°C, ya que es la temperatura base con la cual se inicio el ensayo, asumiendo que las temperaturas posteriores de 55°C y 75°C generan un incremento de las perdidas. La Grafica 3.4 muestra la representacion de los resultados de la tabla 3.11.

Evaluación de la Cohesión a 25°C.			
Numero de revoluciones	Cemento asfaltico.		
	AC-30	AC -20	MT - E3
100	2.279	4.564	1.651
200	7.758	9.275	4.275
300	13.302	14.185	8.312

Tabla 3.11 Promedios de los porcentajes de desgaste utilizados para graficar las curvas de estado de cada tipo de ligante asfaltico.



Grafica 3.1 Muestra la los distintos porcentajes de desgaste sufridos por cada tipo de ligante asfaltico respecto a el numero de revoluciones a las cuales fueron sometidas as briquetas.

En la Grafica 3.1 se puede observar de forma general que a medida que aumenta el grado de severidad del ensayo Cántabro, las pérdidas aumentan para todos los cementos asfálticos. Al iniciar el ensayo Cántabro (0 y 100 revoluciones) se presentan pérdidas bajas, aproximadamente al 4%, cuando la prueba se encuentra entre 100 y 200 revoluciones se presentan pérdidas relativamente inferiores al 8%, además se puede observar que se presenta un aumento pronunciado aproximadamente al 13% en el momento que pasa de 200 a 300 revoluciones.

Es por eso que el punto de evaluación para el análisis de la cohesión de los cementos asfálticos lo hemos concentrado en los resultados que arrojaron las pérdidas al desgaste a las 300 revoluciones las cuales representan un mayor grado de severidad para cada ligante en estudiado.

De acuerdo a los resultados el cemento asfáltico modificado TIPO E3 presenta un menor porcentaje de pérdidas al cántabro respecto a los cementos asfálticos AC-20 y AC-30, ver grafica 3.1. Y entre mayor sea el porcentaje de polímeros SBS menor serán las pérdidas al desgaste por el ensayo Cántabro. Por lo tanto, es lógico considerar que cuanto más duro sea un cemento asfáltico, más capacidad tendrá para absorber en el momento del impacto, presentado así menores pérdidas. Es importante establecer que el fin de agregar polímeros a los asfaltos convencionales es el de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito.

Para el punto de mayor grado de severidad (300rev) se observa en la grafica 3.1 que el asfalto modificado TIPO E3 alcanzó un porcentaje de pérdida del 8.312% mientras que los asfaltos convencionales AC-20 y AC-30 alcanzaron un porcentaje de pérdida de 14.185% y 13.302% respectivamente, siendo estos dos últimos valores casi semejantes ya que la diferencia entre ambos fue tan solo de 0.883%, mas sin embargo es importante aclarar que aun siendo mínima la diferencia según los resultados obtenidos para estos dos asfaltos el AC-30 está mejor posicionado ya que su desgaste al cántabro fue de 0.883% menor respecto al AC-20. Por otro lado el asfalto modificado respecto al asfalto AC-30 alcanza una diferencia de 4.99% siendo el asfalto modificado el que tiene una cohesión mas aceptable respecto a los otros dos asfaltos analizados anteriormente.

SUSCEPTIBILIDAD TERMICA.

Es importante recordar que los cementos asfálticos son materiales termoplásticos que tienen un intervalo de plasticidad reducido, comportándose a bajas temperaturas como productos frágiles y quebradizos y a temperaturas

relativamente elevadas como productos viscosos. Por lo tanto, al hacer una variación de la temperatura, un mismo tipo de cemento asfáltico presenta características similares a las de un cuerpo frágil, elastoplástico o viscoso. Esta variación del estado del cemento asfáltico con la temperatura puede ser estudiada mediante el ensayo Cántabro.

Con los datos presentados en la sección 3.5.3 se pueden trazar las graficas de estado para cada tipo de ligante asfáltico que se está estudiando (AC-20, AC-30 y MODIFICADO TIPO E3). Estas curvas de estados vienen dadas de graficar las diferentes temperaturas de ensayo vrs las pérdidas por desgaste en el ensayo Cántabro producto de someter a las briquetas a las distintas revoluciones especificadas en el método, cada curva representa un mismo porcentaje de ligante (4.5%) y cada punto en los grafico corresponde a un promedio de nueve briquetas ensayadas, véase que las Gráfica 3.2, 3.3 y 3.4 muestran la información de los promedios de porcentajes de pérdidas al cántabro, calculados en la tabla 3.10.

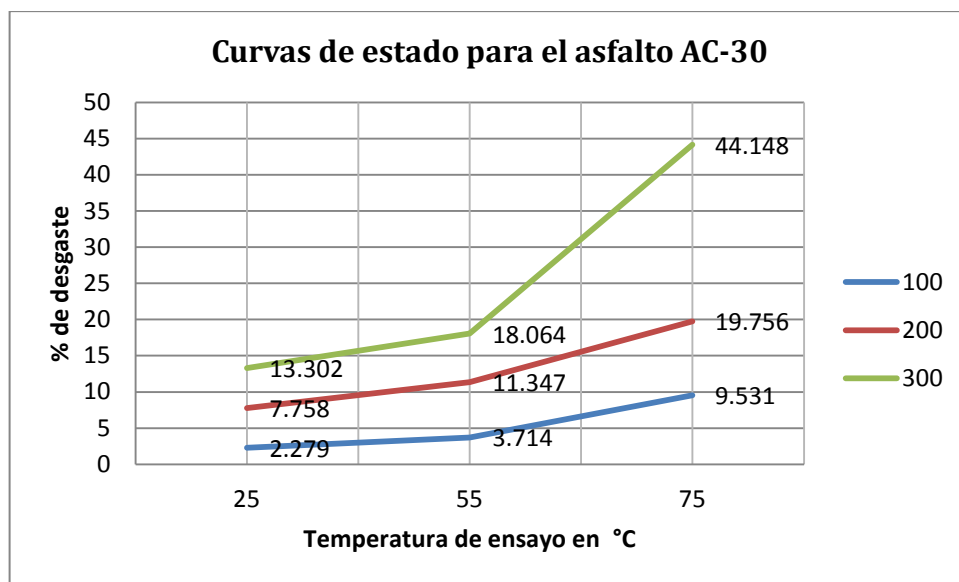


Grafico 3.2. Se muestran la curvas de estado para el asfalto AC-30 a 100, 200 y 300 revoluciones.

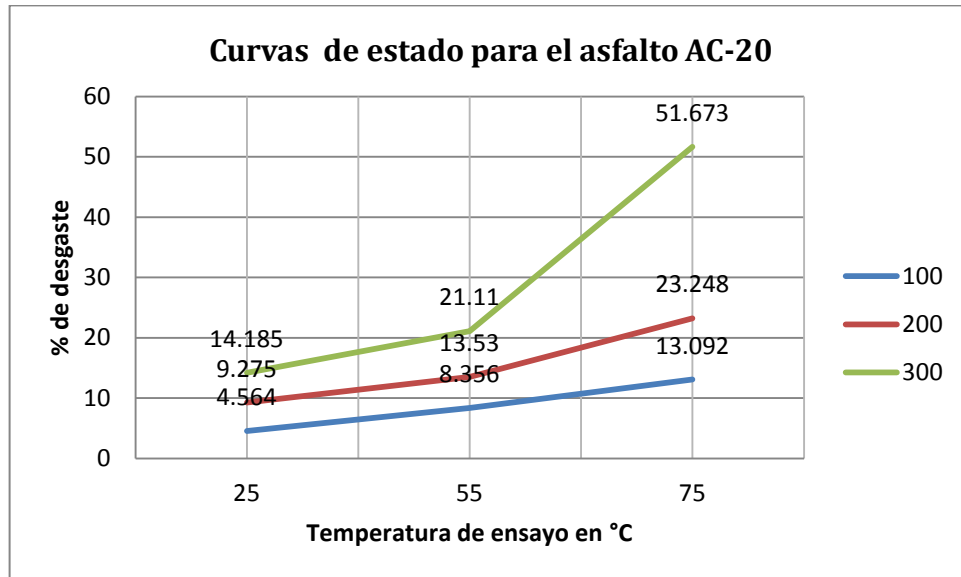


Grafico 3.3. Se muestran la curvas de estado para el asfalto AC-20 a 100, 200 y 300 revoluciones.

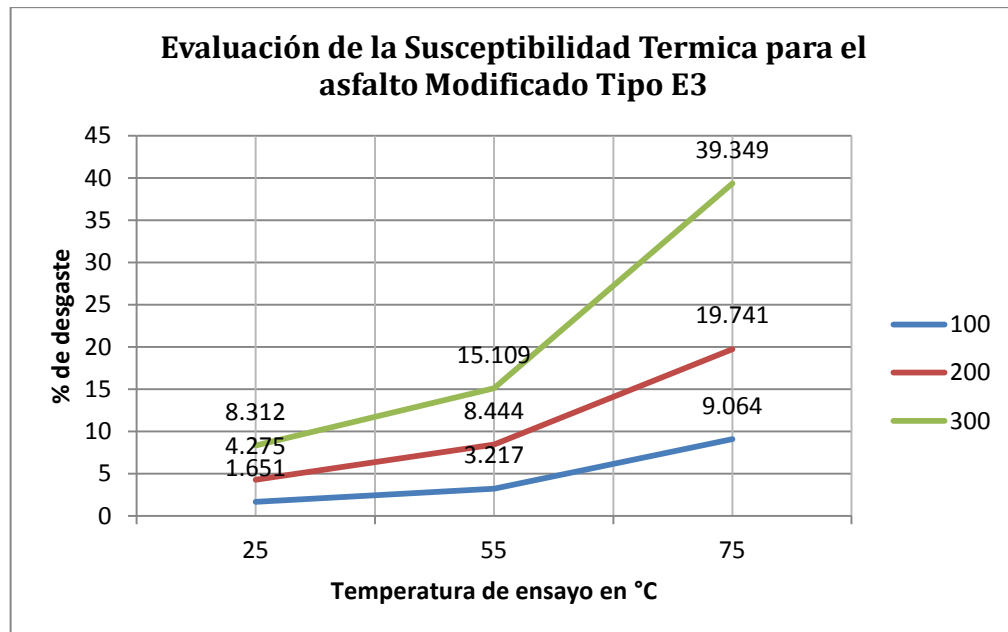


Grafico 3.4. Se muestran la curvas de estado para el asfalto Modificado Tipo E3 a 100, 200 y 300 revoluciones.

Es importante observar que en los graficos 3.2, 3.3 y 3.4 se puede notar que los distintos tipos de asfaltos estudiados presentan una tendencia similar respecto a

su trazado (curva ascendente) de donde se obtiene la evaluación de la susceptibilidad térmica de cada uno de los cementos asfálticos que fueron sometidos a las distintas variaciones de temperatura. De igual forma se puede observar una tendencia general del comportamiento de cada uno de los cementos asfálticos la cual es parecida en cada uno de ellos, los tipos de comportamiento asfálticos (FRAGIL, ELASTOPLÁSTICO e INCONSISTENTE) son identificables cuando ocurre una variación de la temperatura en el desarrollo del ensayo, ver *sección 3.3.2 Susceptibilidad Térmica*. Analizando este comportamiento en los gráficos podemos identificar que el estado de fragilidad no está presente ya que la menor temperatura a la cual se sometieron las briquetas fue de 25°C (temperatura ambiente); en el rango de 25°C a 55°C se puede considerar que las briquetas están en el estado elastoplástico y de los 55°C a los 75°C inicia el tramo de transición a el estado de inconsistencia. Es importante notar que en los dos estados (ELASTOPLÁSTICO E INCONSISTENTE) que muestran las gráficas los asfaltos convencionales son los que sufren los porcentajes más altos de desgaste respecto a los porcentajes sufridos por el asfalto modificado, esto último tiene relación con la mayor cohesión que el asfalto modificado presenta la cual fue previamente evaluada.

Además se puede observar el efecto del grado de severidad, cuanto mayor sea la severidad del ensayo, las pérdidas al desgaste por el cántabro son mucho mayores y se obtienen curvas más altas. En la gráfica 3.5 se observa la Curva de Estado al máximo grado de severidad (300 revoluciones) de cada uno de los cementos asfálticos ensayados.

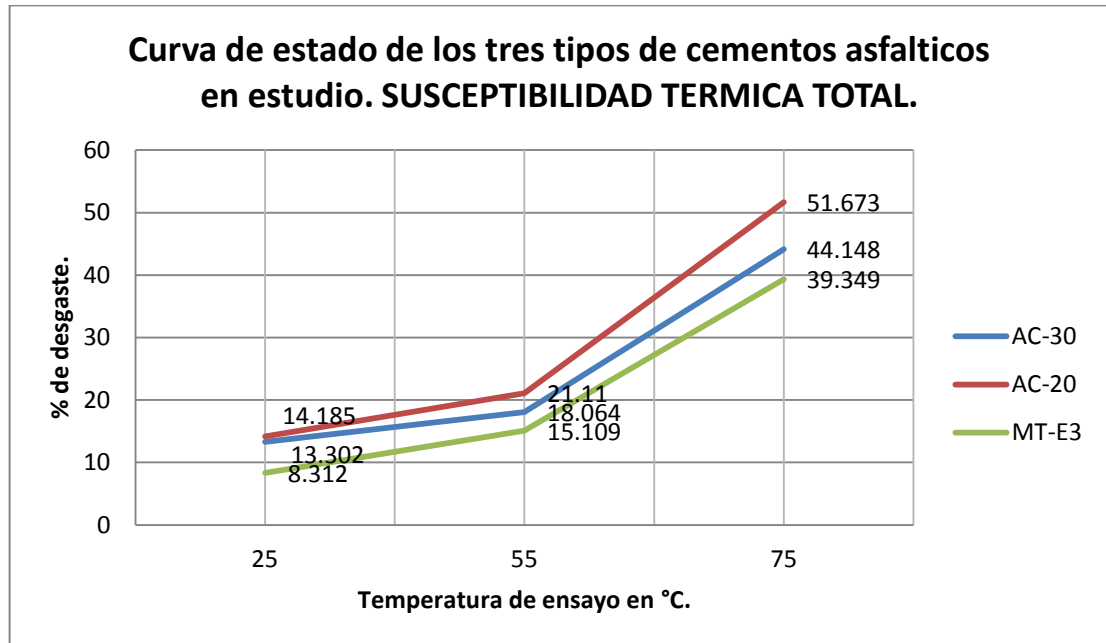


Grafico 3.5. Se muestran la curvas de estado para los tres tipos de asfaltos estudiados AC-30, AC-20 y MT-E3 a la severidad mas alta 300 revoluciones.

De igual forma que en los graficos 3.2, 3.3 y 3.4 en el grafico 3.5 se puede observar un carecimiento del estado de Fragilidad ya que la menor temperatura en las cuales se realizaron los ensayos fue de 25°C.

En el primer punto de analisis de la escala horizontal a temperatura ambiente (25°C) se observa el inicio de una tendencia creciente de la curva de estado para cada tipo de cemento asfáltico y un porcentaje de perdidas para los asfaltos convencionales AC-20 y AC-30 de 14.18% y 13.30% respectivamente, de igual forma para el asfalto polimerizado se observa que presenta un porcentaje de perdida inferior a los asfaltos convencionales.

Las perdidas al desgaste van incrementandose a medida que la temperatura incrementa hasta alcanzar valores, para una temperatura de ensayo de 55°C, de 21.11% y 18.06% para los asfaltos convencionales AC-20 y AC-30 respectivamente, el asfalto modificado con polimeros presenta un ligero incremento respecto al punto anterior alcanzando un 15.1% de desgaste manteniendose este asfalto por debajo del desgaste que alcanza los asfaltos convencionales.

Para el ultimo punto que presenta la grafica 3.5 la tendencia de está se mantiene en crecimiento alcanzando valores para los asfaltos convencionales de 51.67% y 44.14%, mientras que para el asfalto modificado con polimeros el porcentaje de desgaste alcanza 39.34% todo esto para una temperatura de ensayo de 75°C.

Es importante notar que las temperaturas de ensayo que se están evaluando 25°C, 55°C y 75°C no permiten tener una curva de estado completa en la cual se aprecien con claridad los distintos tipos de comportamiento del asfalto producto del ensayo de la susceptibilidad térmica, de igual forma es difícil especificar los criterios de clasificación del cemento asfáltico o sea los límites especificados por el método UCL que definen la fragilidad del asfalto a bajas temperaturas y su inconsistencia a altas temperaturas los cuales se encuentran descritos con claridad en la sección 3.5.1.4.

Por ello podemos concluir que para el gráfico 3.5 en la primera temperatura de ensayo (25°C) ya ha iniciado el estado de PLASTICIDAD y el intervalo de temperaturas de 55°C a 75°C representa un tramo de transición al estado de INCONSISTENCIA.

Para el gráfico 3.5 la cual representa el efecto más alto del grado de severidad ya que es graficada solo con valores de pérdidas al cantabro determinados a 300 revoluciones, es en esta curva de estado donde se evalúa la SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA TOTAL, observando que cuando más tendida sea la curva, menos susceptible será el cemento asfáltico, apreciando este comportamiento en el cemento asfáltico modificado, caso contrario ocurre con los cementos asfálticos convencionales, en donde se presenta una curva de estado más cóncava, siendo más susceptible a cambios de las temperaturas.

3.6 METODOLOGIA PARA LA SELECCIÓN DE LIGANTES ASFÁLTICOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFÁLTICAS.

El desempeño de una capa de pavimento asfáltico depende entre otros aspectos de las condiciones ambientales a las cuales está expuesto durante su etapa de servicio, factores tales como humedad, temperaturas máximas y mínimas que pueda experimentar a lo largo de la capa de rodadura, por mencionar algunos. Debido a las propiedades de los pavimentos flexibles, es importante considerar que la temperatura que experimente dicha capa es una de las principales variables a considerar en el diseño de la mezcla asfáltica en caliente a utilizar en cada zona del territorio nacional.

Por lo general la selección del tipo de ligante asfáltico para producir una mezcla asfáltica debe considerar principalmente las condiciones climatológicas y las solicitaciones de carga debido al flujo vehicular a las que será sometido el pavimento durante su etapa de servicio. Lo anterior con el objetivo de lograr un adecuado desempeño de la estructura, disminuyendo la aparición de deficiencias prematuras tales como ahuellamiento, agrietamiento u otro tipo de fallas.

Los principales factores ambientales a considerar con respecto al desempeño del pavimento y la estructura de pavimento a diseñar, específicamente, son la temperatura y la lluvia. (AASHTO, 1993). La selección específica del grado de asfalto a utilizar debe ser de acuerdo a las condiciones climáticas locales, teniendo en cuenta las normas nacionales e internacionales relacionadas al diseño de mezclas asfálticas.

Existen diferentes metodologías para la selección de ligantes asfálticos utilizados en la producción de mezclas asfálticas, sin embargo para el desarrollo de esta investigación hará referencia a las siguientes metodologías:

1. Método SUPERPAVE
2. Método del departamento de defensa de los Estados Unidos de América.

A continuación se desarrollan en detalle cada una de las metodologías antes mencionadas.

3.6.1 METODOLOGIA DE SELECCIÓN DE LIGANTES DE SUPERPAVE

En 1987, el SHRP⁴⁵ (Strategic Highway Research Program) comenzó el desarrollo de un nuevo sistema para especificación de materiales asfálticos. El producto final del programa de investigación sobre asfaltos del SHRP es un nuevo sistema conocido como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). El software de Superpave es un programa que ayuda a los ingenieros en la selección de materiales asfálticos y el diseño de la mezcla. Fundamentalmente, representa un sistema más avanzado de especificación de los materiales componentes, diseño de mezclas asfálticas y su análisis, y la predicción del desempeño de los pavimentos, incluyendo equipos de ensayo, métodos de ensayo y criterios.

El sistema SUPERPAVE proporciona un medio completo y muy amplio para diseñar mezclas con base en los requerimientos específicos de comportamiento definidos por el tránsito, el clima y la sección estructural del pavimento en una cierta localización. Se facilita con este sistema, la selección y combinación de asfalto, agregado y de ser necesario, un aditivo, para alcanzar el nivel requerido de comportamiento en el pavimento. *(Morales C. A., 2007, pág. 25)*

Para el desarrollo de esta sección solo se analizará la metodología utilizada por Superpave para la selección de ligantes asfálticos. El SUPERPAVE utiliza un sistema completamente nuevo de ensayos, especificaciones y selección de ligantes asfálticos. Aunque no se desarrollaron nuevos ensayos para agregados,

⁴⁵ Programa de Investigación Estratégica de Carreteras.

los métodos de selección y especificaciones fueron refinados e incorporados al sistema de diseño de mezclas.

Hay una nueva especificación SHRP para ligantes en la cual se presenta un rasgo único: tiene como base la performance vial y los ligantes se seleccionan en función del clima. (*Asphalt Institute, SHRP, 1994, pág. 52*)

Especificándose la temperatura mínima y máxima en la que el asfalto presente un adecuado desempeño. La temperatura para la cual los requerimientos deben cumplirse es lo que diferencia a los varios grados de ligantes. Por ejemplo un ligante clasificado como PG 64-22 debe satisfacer los requerimientos de las propiedades físicas a altas temperaturas hasta los 64°C y a bajas temperaturas hasta -22°C. La tabla 3.12 muestra los grados de ligantes correspondientes en la especificación SHRP de ligantes.

Alta Temperatura (°C)	Baja Temperatura (°C)
PG 46-	34, 40, 46
PG 52-	10, 16, 22, 28, 34, 40, 46
PG 58-	16, 22, 28, 34, 40
PG 64-	10, 16, 22, 28, 34, 40
PG 70-	10, 16, 22, 28, 34, 40
PG 76-	10, 16, 22, 28, 34
PG 82-	10, 16, 22, 28, 34

Tabla 3.12. Grados del ligante de SUPERPAVE.

Fuente: Background or SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis, 1994, pag.33)

El sistema SUPERPAVE dispone de tres metodologías a través de las cuales se puede seleccionar el tipo de asfalto, las cuales corresponden a:

- Área geográfica. En el caso que la agencia desarrolla un mapa, donde se muestre los grados de asfalto a ser usado por el diseñador, en base a las condiciones climáticas o políticas que se hayan establecido.
- Temperatura del pavimento. El diseñador determina la temperatura de diseño del pavimento.
- Temperatura del aire. El diseñador determina la temperatura del aire, la cual es convertida a temperatura de diseño del pavimento.

La selección del grado de ligante asfáltico, a partir de la temperatura del aire, es obtenido de la base de datos de las estaciones meteorológicas, de las cuales se

determina la temperatura promedio de aire correspondiente al periodo de siete días continuos más calientes registrados en cada una de las estaciones meteorológicas que se incluyan en la investigación. Según los investigadores del programa SHRP, el valor promedio de esos siete días es considerado como un método óptimo para caracterizar la condición de diseño para altas temperaturas. **(Morales & Alvarenga, 2010, pág. 76)**

Para cada año del que se disponen datos, se determina el periodo de siete días más cálidos y se calcula el promedio de la temperatura del aire para esos siete días consecutivos. Para todos los años registrados se calculan un valor medio y la desviación standard. Así mismo, se identifica el día más frío de cada año y el valor medio y la desviación standard son calculados. **(Asphalt Institute, SHRP, 1994, pág. 29)**

Es importante considerar que la temperatura que será utilizada en la selección del grado de ligante asfáltico corresponde a la temperatura del pavimento y no a la temperatura del aire. Al respecto, SUPERPAVE define la máxima temperatura de diseño del pavimento a una profundidad de 20 mm bajo la superficie y la mínima temperatura de diseño del pavimento en la superficie del pavimento. Con el objetivo de determinar la temperatura del pavimento de manera indirecta, se han desarrollado modelos, considerando entre otros parámetros valores típicos de absorción solar, transmisión de radiación a través del aire, radiación atmosférica y velocidad del aire.

La ecuación desarrollada para determinar la máxima temperatura del pavimento es la siguiente:

$$T_{20mm} = (T_{aire} - 0.00618Lat^2 + 0.2289Lat + 42.2)(0.9545) - (17.78)$$

Donde:

T_{20mm} = Máxima temperatura de diseño del pavimento a una profundidad de 20 mm (°C)

T_{aire} = Temperatura promedio máxima del aire correspondiente al periodo de siete días continuos más calientes (°C).

Lat. = Latitud geográfica del proyecto en grados.

La ecuación desarrollada para determinar la temperatura mínima del pavimento es la siguiente:

$$T_{min} = (0.859)(T_{aire}) + 1.7$$

Donde:

T_{\min} = Mínima temperatura de diseño del pavimento (°C).

T_{aire} = Temperatura mínima del aire en año promedio (°C).

Aunado a esto el diseñador deberá considerar adicionalmente cierto grado de confiabilidad en el proceso de selección de ligante asfáltico, relacionado con la posibilidad de que las temperaturas que ocurran en la zona no superen las temperaturas máximas y mínimas de diseño.

Se debe tener en cuenta que la selección del grado de asfalto en base al clima, considera que la capa de rodadura donde estará incorporado el asfalto, estará sometida a cargas rápidas (velocidad de 90 km/h) y para un tráfico de aproximadamente 30 millones de ESAL⁴⁶ estimados para un periodo de 20 años. Por lo tanto en vías que estarán sometidas a tráfico lento o estacionario o niveles mayores de carga vehicular, respecto a los establecidos en el modelo, debe realizarse un incremento de uno o dos grados en el asfalto seleccionado bajo criterios del clima, este criterio esta resumido en la tabla 3.13.

Volumen de Trafico ESAL (Millones)	Condiciones de Velocidad del Vehículo		
	Estacionaria	Baja	Estándar
< 0.3	-----	-----	-----
0.3 – 3	2	1	-----
3 – 10	2	1	-----
10 – 30	2	1	-----
> 30	2	1	1

Tabla 3.13. Ajuste del grado de ligante asfáltico (PG) con base en volumen y velocidad de tráfico.

Fuente: SUPERPAVE Fundamentals Reference Manual, National Highway Institute.

Cabe mencionar que estos criterios de aumento de grados en función de la velocidad del vehículo son aplicables solo para zonas con temperaturas altas ya que dichas variantes no influyen a bajas temperaturas.

⁴⁶ Equivalent Simple Axial Load que traducido al castellano no es más que Ejes Equivalentes Simples.

3.6.2 Método del INSTITUTO DEL ASFALTO.

El Instituto del Asfalto, en el documento THICKNESS DESIGN Asphalt Pavements for Highways & Street, Manual Series No.1 (MS-1), en el Capítulo VI Structural Design Procedure, indica que las mezclas asfálticas son influenciadas por la temperatura, por lo que en general se recomienda que los grados de asfalto a utilizar correspondan a las condiciones de temperatura que prevalezcan. Al respecto, en dicho documento se presentan algunos criterios para la selección del grado de cemento asfáltico para diferentes condiciones de temperatura, los cuales se basan en la Temperatura media anual del aire registrado en la zona donde se desarrollará el proyecto.

A continuación en la Tabla 3.14, se presenta los criterios de selección del grado de asfalto:

Condición de Temperatura	Temperatura Media Anual del Aire	Grados de Asfalto recomendados	
Fría	Menor o igual a 7°C (45°F)	AC-5 AR-2000 120/150 PEN	AC-10 AR-4000 85/100 PEN
Cálida	Entre 7°C (45°F) y 24°C(75°F)	AC-10 AR-4000 85/100 PEN	AC-20 AR-8000 60/70 PEN
Caliente	Mayor o igual a 24°C (75°F)	AC-20 AR-8000 60/70 PEN	AC-40 AR-16000 40/50 PEN

Tabla 3.14 Criterios de selección de grado de asfalto según Instituto del Asfalto.
Fuente: Adaptado de THICKNESS DESIGN Asphalt Pavements for Highways & Street, Manual Series No.1 (MS-1)

3.6.3 METODOLOGIA DEL DEPARTAMENTO DE DEFENSA DE LOS ESTADOS UNIDOS.

La metodología utilizada por el departamento de defensa de los estados unidos se encuentra con mayor detalle en el documento ESTÁNDAR MANUAL PRACTICE FOR FLEXIBLE PAVEMENTS, (UFC 3-250-03, año 2001), las partes más importantes se detallan a continuación:

Selección de ligante asfáltico por la temperatura de la región.

Determinación de la temperatura de la región. La tabla 3.15 brinda una guía para la selección del ligante asfáltico según la temperatura de la región. Los datos climatológicos son requeridos para proporcionar una entrada para el método de selección. Primero, los datos de temperatura máxima promedio mensual son necesarios para calcular un Índice de Temperatura del Pavimento (**Pavement Temperature Index, TPI⁴⁷**), cuando la zona de localización del proyecto tiene temperaturas promedio máximas mensuales arriba de los 23.9°C (75° F), el PTI es definido como la suma de los excedentes mensuales de 23.9°C. Inversamente, cuando no existen promedios mensuales de temperatura que excedan los 23.9°C, el PTI es definido como la diferencia entre el promedio máximo mensual más alto de temperatura del mes más cálido y 23.9°C. (Departamento de Defensa, 2001). Partiendo de los resultados del PTI calculado se establecen criterios para clasificar la temperatura de una región, lo cual es utilizado como guía en la selección del cemento asfáltico, esto se resume en la tabla 3.15.

Índice de Temperatura del Pavimento, Acumulado °C (°F)	Temperatura de la Región	Criterio de Selección de Ligante Asfáltico
Menos de 16.7 (30)	Fría	Utilizar Método Penetración Viscosidad para regiones Frías.
16.7 a 44.4 (30 a 80)	Cálida	Asfalto con penetración 85-100 (asfalto original)
Mayor de 44.4 (80)	Caliente	Asfalto con penetración 60-70 (asfalto original)

Tabla 3.15 Criterios de selección de ligante asfáltico basado en el Índice de Temperatura del Pavimento (PTI). Fuente: Adaptado de Standard Practice Manuals for Flexible Pavements, UFC 3-250-03, 2001, Tabla 2.3

Es de notar que aunque el criterio de selección del ligante asfáltico está relacionado con el resultado del ensayo de penetración, los ligantes asfálticos sugeridos son clasificados por sistema de clasificación por viscosidad, tales como AC-5, AC-10, AC-20, AC-30, ó AC-40.

⁴⁷ Indicador de temperatura del pavimento.

En la tabla 3.15 se observa que la selección del ligante asfáltico para zonas con temperaturas cálidas o calientes se realiza directamente del valor acumulado del PTI y para las zonas clasificadas como frías se debe implementar un método adicional identificado como Penetración-Viscosidad específicamente para zonas con bajas temperaturas.

Sin embargo ya que en El Salvador no existen zonas con temperaturas bajas como para clasificarla como fría, esta metodología adicional no será utilizada en el desarrollo de esta investigación.

3.7 SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO PARA PRODUCIR MESCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EN EL SALVADOR.

La selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en caliente en el país, se ha realizado considerando principalmente las metodologías SUPERPAVE, INSTITUTO DEL ASFALTO y del DEPARTAMENTO DE DEFENSA DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA, a las cuales se hizo referencia anteriormente en el numeral 3.6.1, 3.6.2 y 3.6.3 de este documento. Las metodologías antes referidas, se basan fundamentalmente en la información climatológica de la zona de emplazamiento del proyecto donde se incorporará la mezcla asfáltica.

En la presente investigación se ha utilizado registros históricos de temperatura del aire y registros de temperatura de la superficie del pavimento (ver tabla 3.2), correspondiente a zonas representativas del país, las estaciones meteorológicas de las cuales se extrajo la información de temperatura del aire mensual, máxima y mínimas se encuentran en la tabla 3.1 y la información proporcionada por estas estaciones se encuentra en el ANEXOS A. Esta información permitirá el uso del MÉTODO DEL DEPARTAMENTO DE DEFENSA DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA.

Además de las temperaturas máximas y mínimas, registradas en las estaciones meteorológicas antes referidas, también se ha considerado en el análisis la información sobre la temperatura media anual del aire registrada en el país, para el empleo del MÉTODO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO, correspondiente al periodo de análisis de 1970 a 2003, contenida en mapas elaborados por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), los cuales se encuentran disponibles en el sitio web de esa Institución⁴⁸. Con base en la información

⁴⁸ <http://www.snet.gob.sv/>

contenida en dichos mapas, se ha estimado los rangos de temperaturas media anual del aire, en la zona de emplazamiento de cada una de las estaciones meteorológicas.

A continuación, en la Tabla 3.16, se presenta un resumen de los valores extremos de temperatura máxima y mínima, así como temperatura media anual, registradas en esas zonas del país en los periodos 1983-2002 y 1970-2003, respectivamente. Para la selección del tipo de cemento asfáltico mediante el método de SUPERPAVE se utilizara la tabla 3.2 en la cual se establece la temperatura a 20mm de profundidad para cada zona de medición y con la ayuda de la tabla 3.12 se establecerá el grado de ligante más recomendable según el método.

No	Estación Meteorológica	Mayor temperatura a promedio máxima mensual		Menor temperatura a promedio mínima mensual		Índice de Temperatura del Pavimento (ITP)		Rango de Temperatura a media anual (°C)
		°C	Año	°C	Año	Máximo	Año	
1	La Unión	37.9	1983	18.1	1997	128.0	1987	27 - 29
2	Acajutla	37.3	1995	21.1	1985	121.0	1990	27 - 29
3	Puente Cuscatlán	39.9	1995	17.1	1989	153.4	2002	22 - 24
4	El Papalón	40.5	2002	16.8	1991	144.1	1987	27 - 29
5	Cerrón Grande	40.1	2001	13.2	1996	149.2	2001	25 - 26
6	San Andrés	37.5	1984	13.7	1985	115.9	1983	22 - 24
7	El Palmar	35.5	2001	12.9	1986	91.2	2001	22 - 24
8	Perquin	29.6	1998	14.5	2001	32.5	2002	13 - 18
9	Las pilas	30.0	1994	9	1986	6.1	1994	13 - 18
10	Planes de Montecristo	24.2	1986	7.4	1998	0.3	1986	13 - 18

Tabla 3.16 Valores extremos de temperatura promedio máxima, mínima y mensual registradas en el país. Fuente: Elaborado con base en registros de temperatura De la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Con base en la tabla 3.2 y el análisis de los registros históricos de la temperatura del aire (máximas, mínimas y media anual) ocurrida en el país y en las metodologías de SUPERPAVE, del Departamento de Defensa de los Estados Unidos y el Instituto del Asfalto, se ha determinado los tipos de cemento asfáltico recomendado para cada una de las zonas donde se localizan las estaciones meteorológicas consideradas en la investigación. A continuación, en la tabla 3.17

se presenta un resumen de los tipos de cemento asfáltico recomendados, dicha tabla representa para un diseñador de proyectos viales una guía para la elección del mejor cemento asfáltico según la zona de emplazamiento del proyecto de igual forma la figura 3.32 muestra el esquema del mapa del territorio nacional especificando la elección del mejor cemento asfáltico para cada departamento, este mapa fue generado basándose en la información obtenida de la tabla 3.17.

3.8 GUÍA PARA LA SELECCION DEL CEMENTO ASFÁLTICO DE ACUERDO A LA ZONA DE EMPLAZAMIENTO DEL PROYECTO.

N°	Estaciones meteorológicas	Ubicación de estaciones meteorológicas por departamento	Zonas de medición de campo	TPOS DE CEMENTO ASFALTICOS RECOMENDADOS.				
				Método SUPERPAVE.	Método del Departamento de Defensa de los Estados Unidos.		Método del Instituto del Asfalto.	
				Tipo de Asfalto.	Clasificación de Región	Tipo de Asfalto.	Clasificación de Región	Tipo de Asfalto
1	La Unión.	La Unión.	N/V	PG 70	Caliente.	PEN 60/70	CALIENTE	AC - 20 AC - 30
2	Acajutla.	Sonsonate.	Acajutla.	PG 64				
3	Puente Cuscatlán.	San Vicente.	Puente Cuscatlán.	PG 64				
4	El papalón.	San Miguel.	Desvió el Delirio.	PG 70				
5	Cerrón Grande.	Cabañas.	N/V	PG 64				
6	San Andrés.	La Libertad.	San Salvador.	PG 58				
7	El palmar.	Santa Ana.	Cerró Verde.	PG 59	Cálida.	PEN 85/100	CALIDA	AC - 10 AC - 20
8	Perquín.	Morazán.	San Francisco Gotera.	PG 70				
9	Las Pilas.	Chalatenango.	Desvió Amayo.	PG 64				
10	Planes de Montecristo.	Santa Ana.	Metapan.	PG 58	Fría.	-----		

Tabla 3.17 Tipos de cemento asfáltico recomendados para diferentes zonas del país, con base en las metodologías de SUPERPAVE, Departamento de Defensa de los Estados Unidos y del Instituto del Asfalto.

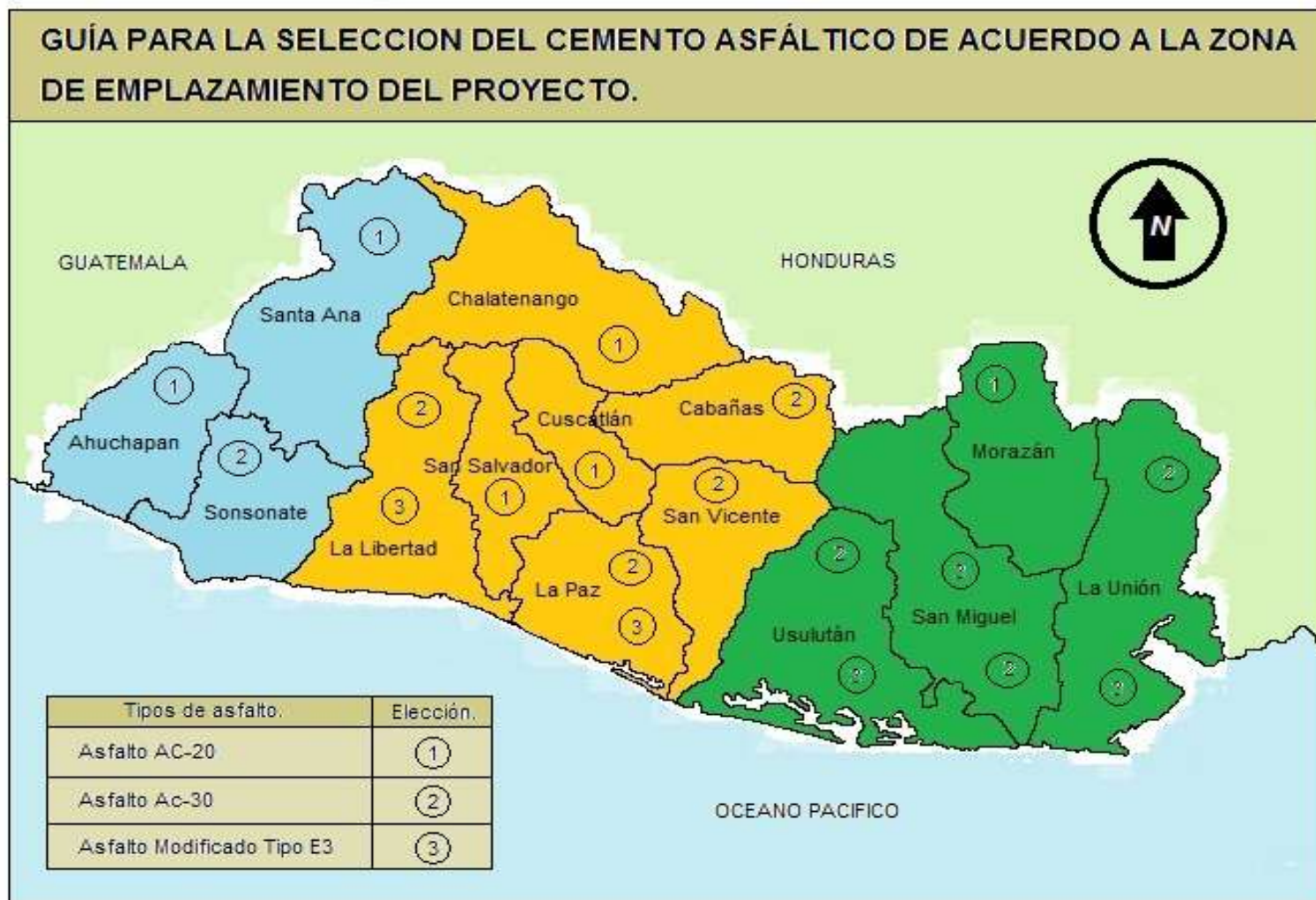


Figura 3.32 Mapa de El Salvador mostrando la selección del mejor cemento asfaltico basándose en la información obtenida de la tabla 3.17.

CAPITULO IV. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES.

1. La guía para la elección de cementos asfálticos desarrollada para la presente investigación está hecha con la finalidad de que el lector adquiera la pauta de cuál es el mejor cemento asfáltico para cada zona del país más sin embargo se debe tener bien claro que la elección de un cemento asfáltico debe realizarse en la etapa de diseño del proyecto en el cual será empleado el cemento asfáltico considerando las condiciones ambientales del sitio de emplazamiento del proyecto y demás criterios que el diseñador considere.
2. Los resultados presentados en la tabla 3.2 de la temperatura a la cual se encuentra el pavimento asfáltico trabajando in situ nos indican que a las horas de mayor intensidad solar éstas alcanzan la máxima temperatura de servicio, la cual pudimos registrar en la investigación, alcanzando un máximo de 68.29°C para el método SUPERPAVE y 67.00°C para el método de campo respectivamente, basándonos en el método UCL específicamente en el análisis de la susceptibilidad térmica abordada en la sección 3.5.1 podemos establecer que las carreteras a las cuales estudiamos no alcanzaban el estado de inconsistencia del cemento asfáltico, mas sin embargo si alcanzaban la etapa de transición que las llevaría a tan fatídico estado.
3. Se considera que el empleo de la fórmula para determinar la temperatura máxima de un pavimento establecida en el método SUPERPAVE genera resultados semejantes a los proporcionados por el método de determinación directa de la temperatura del pavimento in situ, sin embargo la experimentación en campo proporciona al investigador una mayor cantidad de información la cual esté puede interpretar y generar mejores resultados.
4. Se considera que el buen desempeño de una capa de rodadura de mezcla asfáltica, no depende únicamente de la adecuada selección del tipo de cemento asfáltico, sino que también depende entre otros aspectos de las características de los agregados (forma y granulometría) utilizados, del contenido de cemento asfáltico de la mezcla, de los procesos de producción de la mezcla asfáltica, de los procesos constructivos utilizados para su

colocación, así como de las solicitaciones de carga y medio ambiente al cual estará expuesta la vía.

5. Se debe aclarar que el Método de Caracterización Universal del Ligante (UCL) es un método que permite realizar una evaluación de las propiedades físicas más importantes de los ligantes, tales como la Cohesión, Susceptibilidad Térmica, Envejecimiento, entre otras. Más no se debe tomar como un método de diseño de mezcla.
6. Los requerimientos que los pétreos y el ligante debían cumplir para la elaboración de los especímenes fabricados en el laboratorio por el grupo investigador, se tomaron del método UCL, estos requerimientos eran esencialmente para evaluar los tipos de ligante que comúnmente se utilizan en el territorio nacional para desarrollar proyectos viales, es por ello que aclaramos que la mezcla utilizada para la fabricación de especímenes (briquetas) no tienen que ver en nada con las mezclas asfálticas colocadas en las vías, las cuales han sido diseñadas para ciertas condiciones.
7. Según los resultados obtenidos del análisis de la susceptibilidad térmica realizada a las mezclas asfálticas fabricadas con los asfaltos AC-20, AC-30 y MODIFICADO TIPO E3 es concluyente establecer que tanto la mezcla asfáltica fabricada con asfalto AC-30 y asfalto MODIFICADO TIPO E3 presentan mejores resultados al desgaste producto de las variaciones de temperatura a las cuales fueron sometidos, indicándonos que estos dos tipos de asfalto son los más idóneos para formar parte de forma independiente de una mezcla asfáltica que vaya a ser utilizada para un proyecto carretero en cualquier zona del país.
8. La importancia del estudio de la Susceptibilidad Térmica de los ligantes asfálticos empleados para la elaboración de mezclas asfálticas en nuestro país es de gran valor ya que dicha propiedad física de los ligantes repercute directamente en capacidad de la mezcla asfáltica de soportar exitosamente el trabajo al cual será sometida a lo largo de su vida útil.
9. La temperatura de mezclado para la elaboración probetas MARSHALL con mezclas asfálticas en caliente debe ser cuidadosamente controlada basándose en la norma NLT 159/63 "METODO MARSHALL PARA MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE" ya que si el mezclado sobrepasa

el rango de temperatura normado ($145^{\circ}\text{C} - 160^{\circ}\text{C}$), las propiedades químicas del ligante se verán afectas produciendo resultados erróneos en el ensayo cántabro.

10. El empleo del método SUPERPAVE para la determinación de la máxima temperatura del pavimento asfáltico a la cual una carretera se ve expuesta, mediante el uso de la fórmula presentada en la sección 3.2.1, se puede emplear en El Salvador obteniendo resultados semejantes al método de campo, siempre y cuando el investigador seleccione adecuadamente las estaciones meteorológicas que proporcionaran los datos estadísticos de temperatura ambiental, tomando en consideración que cada estación meteorológica consta de un radio de acción de alrededor de 50 a 60 km.

4.2 RECOMENDACIONES.

1. La determinación de la temperatura del pavimento asfáltico por medio del método de campo ha sido poco practicada en el país por las empresas que se dedican al desarrollo de proyectos viales pues no han considerado la importante incidencia que tiene la temperatura del pavimento en la vida útil del mismo. Sería importante que se generaran estudios más completos acerca del comportamiento y determinación de la temperatura del pavimento ya que de esta forma se podría tener un sistema vial más aceptable capaz de soportar condiciones climáticas adversas.
2. En la determinación de la temperatura del pavimento asfáltico en campo es recomendable realizar por lo menos seis perforaciones a un tramo de carretera para llevar a cabo el método descrito en la sección 3.2.2.1 ya que existen carreteras que por su diseño drenante hacen que el aceite térmico sea absorbido rápidamente generando resultados erróneos al momento de tomar la medición de la temperatura.
3. En la etapa de diseño de mezcla establecer la obligación, por parte de la empresa encargada del proyecto, de realizar un estudio de la susceptibilidad térmica del cemento asfáltico a emplear para la elaboración de la mezcla con la finalidad de garantizar que el ligante a emplear es el más idóneo respecto a la zona donde se llevara a cabo el proyecto.
4. Controlar la temperatura a la cual es calentado el ligante como la temperatura a la cual es mezclado con los pétreos, para formar las probetas MARSHALL, mediante el uso de equipo adecuado para evitar fallas en las probetas ensayadas, producto del deterioro de sus características químicas que definen a cada ligante.
5. El trabajo con mezclas asfálticas en caliente y la manipulación de las mismas puede representar un riesgo físico para el investigador, es por ello que el empleo del equipo adecuado para la correcta manipulación de las mezclas es fundamental ya que de esa forma se evitaran posibles daños que comprometan la salud física del investigador.

GLOSARIO.

Adherencia: es la propiedad de la materia por la cual se unen dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares.

Agregado fino: Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4) y queda retenido en el tamiz de 75 μ m (No. 200).

Agregado grueso: Agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4).

Agregado: Es un material granular duro de composición mineralógica, usado para ser mezclado en diferentes tamaños de partículas graduadas, como parte de una mezcla asfáltica, llamados también áridos o pétreos. Los agregados típicos incluyen la arena, la grava, la escoria de alto horno, o la roca triturada y polvo de roca.

Ahuellamiento: es una forma de deterioro superficial asociado con las condiciones de carga y climáticas a las que está sometido el pavimento en servicio. Se desarrolla gradualmente y aparece como una depresión continua en las bandas de circulación de los neumáticos, dificultando la maniobrabilidad de los vehículos y ocasionando una disminución en la seguridad.

Asfalto: es un material viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras, autovías o autopistas.

Asfáltenos: son compuestos químicos orgánicos y representan los compuestos más pesados y por tanto de mayor punto de ebullición. Una vez separados de los máltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito. Los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza y se encuentran disueltos en los máltenos, es decir es la fase discontinua del asfalto.

Briquetas: Las briquetas se preparan con diferentes contenidos de asfalto estos contenidos tienen una variación de 0,5 %.

Cántabro húmedo: Permite valorar la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua en la mezcla y el efecto que produce el empleo de ligantes modificados en la mejora de esa propiedad.

Cántabro seco: Se aplica a las mezclas bituminosas fabricadas en caliente y de granulometría abierta, cuyo tamaño es inferior a 25 mm. El ensayo es

realizado a una temperatura de 25 °C, lo cual permite valorar indirectamente la cohesión y trabazón, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tránsito.

Capa base granular: Capa constituida por un material de calidad y espesor determinados y que se coloca entre la sub-base y la capa de rodadura.

Capa de rodadura: Es la construida en la parte superior del pavimento, debe resistir las presiones verticales de contacto aplicadas por los neumáticos, las tensiones tangenciales de frenado, las succiones debidas al comportamiento de los neumáticos, etc. La calidad de los materiales que constituyen la capa de rodadura, deben estar en consonancia con la gran importancia de las sollicitaciones a que se ve sometida.

Capa de sub base granular: Capa constituida por un material de calidad y espesor determinados y que se coloca entre la subrasante y la base.

Carpeta: La carpeta asfáltica es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir.

Centiestokes: Unidad de viscosidad cinemática (cst), es utilizada como unidad de medición de la viscosidad de los líquidos.

Clima templado: Es aquel que tiene veranos que no son muy calurosos e inviernos que no son muy fríos.

Comportamiento elástico plástico: Transición entre el comportamiento frágil y el comportamiento plástico.

Comportamiento frágil: Fractura bajo niveles de esfuerzos principalmente elásticos con poca o ninguna ductibilidad.

Comportamiento plástico: Fractura frágil bajo fluencia general. Comúnmente acompañada por deformaciones grandes.

Concreto asfáltico: Consistirá en una combinación de agregados gruesos triturados, agregado fino y polvo mineral, uniformemente mezclados a diferentes temperaturas, con cemento asfáltico en una planta de mezclas asfálticas que reúna los requisitos de calidad y control para su producto.

Cutback: Asfalto rebajado, es un residuo del petróleo (asfalto) el cual se ha mezclado con destilados del petróleo.

Densidad: es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia.

Destilación: es la operación de separar, mediante evaporización y condensación, los diferentes componentes líquidos, sólidos disueltos en líquidos o gases licuados de una mezcla, aprovechando los diferentes puntos de ebullición de cada una de las sustancias ya que el punto de ebullición es una propiedad intensiva de cada sustancia, es decir, no varía en función de la masa o el volumen, aunque sí en función de la presión.

Emulsión: Líquido que tiene en suspensión pequeñísimas partículas de sustancias insolubles en agua.

ESAL: Equivalent Simple Axial Load que traducido al castellano significa: Ejes Equivalentes Simples.

Esfuerzo cortante: El esfuerzo cortante, de corte, de cizalla o de cortadura es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico como por ejemplo una viga o un pilar.

Esfuerzo de tracción: Es someter a una briqueta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la briqueta.

Esfuerzo: Medida de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo expresado en unidades de fuerza por unidad de área.

Especificaciones técnicas: Determinación, explicación o detalle de las características o cualidades de un proyecto.

Estaciones Meteorológicas: es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos.

Fallas por fatiga: La falla estructural en un pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito, sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de cada capa; en este sentido la falla relaciona la deformación o la tensión producida con el

número de repeticiones admisibles; esto se denomina falla por fatiga o sea por repeticiones de carga.

Flexibilidad: Es el rango máximo de movimiento.

Fuel: Combustible líquido derivado del petróleo.

Granulometría abierta: Está conformada por materiales pétreos de granulometría uniforme con bajo contenido de finos y alto porcentaje de vacíos.

Granulometría discontinua: Se tiene una granulometría discontinua cuando hay ciertos tamaños de grano intermedios que faltan o que han sido reducidos o eliminados artificialmente.

Granulometría: Es la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

Grietas de fatiga: Es un mecanismo de fallo complejo que incluye la aparición y la propagación de fisuras, así como el detenimiento y la rehabilitación de éstas.

Hidrocarburos: Compuestos de carbono e hidrógeno, producidos naturalmente (Ej. Metano, óxidos de carbono) y por el hombre a partir de derivados del petróleo. Gases o líquidos, de cadenas abiertas (alifáticos) o cerradas (aromáticos).

HMA: Hoja de mezcla asfáltica u hoja de pavimento asfáltico.

Ligante: Un compuesto adhesivo que liga y mantiene unidos dos elementos.

Ligante asfáltico modificado: Es un asfalto al cual se le ha añadido de manera homogénea y estable, cierto porcentaje previamente analizado de algún tipo de aditivo, para mejorar sus propiedades reológicas.

Maquina de los Ángeles: Es la máquina que se utiliza para realizar el ensayo de desgaste de Los Ángeles (Ensayo Cántabro). En el cual se determina el valor de la pérdida por desgaste de las mezclas bituminosas, sin la carga abrasiva de las bolas, se hace girar el tambor a velocidades, de 3.1 a 3.5 rad/s (30 a 33 rpm), durante 300 vueltas para mezclas en caliente.

Máltenos: son líquidos viscosos formando la fase continua del asfalto. Su contenido se asocia a las propiedades mecánicas mostradas por el asfalto. Generalmente, existe mayor proporción de máltenos que de asfáltenos en los asfaltos. El mayor contenido de máltenos y su naturaleza química son las que le dan la calidad a un asfalto.

Meteorización: Es la alteración que se produce en las rocas al entrar en contacto con la atmósfera.

Método de ensayo Cántabro por pérdida de desgaste: Se utiliza para determinar el porcentaje del ligante óptimo para la mezcla.

Mezcla asfáltica con material reciclado: Proceso mediante el cual un pavimento asfáltico existente sobre una carretera vial es desintegrado o triturado en sitio por medio de equipos de fresado y el material producto de esta trituración es posteriormente mezclado, con la finalidad de producir una mezcla adecuada para ser utilizada como una nueva base de un pavimento asfáltico.

Mezcla asfáltica densa: 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 transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. La proporción de vacíos no supera el 6 %.

Mezclas asfálticas abiertas: 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 transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. La proporción de vacíos supera el 12 %.

Microaglomerados: Son mezclas con un tamaño máximo de agregado pétreo limitado inferior a 10 mm., 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.

Oxidación: Se denomina oxidación a la reacción que resulta del ataque del oxígeno a cualquier otra sustancia. Se dice que la sustancia se ha oxidado y que se ha formado una molécula que se denomina óxido; Reacción química en el

que un átomo o molécula cede electrones aumentando su carga eléctrica positiva.

Pavimento: Es la capa constituida por uno o más materiales que se colocan sobre el terreno natural o nivelado, para aumentar su resistencia y servir para la circulación de personas o vehículos.

Película fina: En general, se refiere a películas cuyo espesor va de 0.1 μm hasta unos 300 μm

Petróleo: El petróleo es una mezcla heterogénea de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua. También es conocido como petróleo crudo o simplemente crudo.

Piel de cocodrilo: Roturas longitudinales y transversales, con separación menor que 15 cm, y con abertura creciente según avanza el deterioro. Generalmente presenta hundimiento del área afectada.

PIT: Índice de temperatura del pavimento.

Polímeros: son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas y termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

Polimeración: Formación de moléculas más grandes, generando una estructura mas rígida.

Propiedades físicas: Las propiedades físicas son aquellas en las que se mantienen las propiedades originales de la sustancia ya que sus moléculas no se modifican.

Propiedades químicas: Se manifiestan cuando los materiales sufren una transformación debida a su interacción con otras sustancias.

La oxidación: es la facilidad con la que un material se oxida, es decir, reacciona en contacto con el oxígeno del aire o del agua. Los metales son los materiales que más se oxidan.

Punto de Asfalto: se le llama así a un determinado porcentaje de ligante respecto al peso del agregado en una mezcla asfáltica.

Punto de ebullición: El punto de ebullición es aquella temperatura en la cual la materia cambia de estado líquido a gaseoso. Expresado de otra manera, en un líquido, el punto de ebullición es la temperatura a la cual la presión de vapor del líquido es igual a la presión del medio que rodea al líquido.

Rasante: Consideración de una línea, de una calle, camino o terreno, con respecto a su inclinación con la horizontal.

Reología: Estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales.

Sección transversal: Es un corte vertical normal al alineamiento horizontal. Este corte permite definir la disposición de los elementos y dimensiones que forman el camino en el punto correspondiente a cada sección y su relación con el terreno natural.

Susceptibilidad Térmica: se le llama así, a la variación de la consistencia del asfalto con respecto a la temperatura.

SUPERPAVE: SUPerior PERforming PAVEments.

Viscosidad: Es la resistencia que opone un fluido a deformarse cuando está sometido a la acción de una fuerza que actúa durante un determinado tiempo y es consecuencia del rozamiento interno de las moléculas del mismo.

4.3 BIBLIOGRAFIA.

- Asfalto., I. d. (1973). *Manual del asfalto*. (primera edición. ed.). (M. Velazquez, Trad.) España: Artes Graficas Grijelmo.
- Asphalt Institute, SHRP. (1994). *Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis*. Lexington, KY.
- Background or SUPERPAVE asphalt mixture design and analysis, 1994, pag.33
- Bocaz, Cristián Salgado. (2008). *Diseño de Base tratada de Escoria de Asfalto espumado para Caminos Básicos*. Concepcion.
- Cortez. Jose Mauricio. (2002). *Guía básica de diseño, control de producción y colocación en caliente*. Mexico.
- Departamento de Defensa, E. U. (2001). *Standard Practice Manual for Flexible Pavements*.
- e-asfalto. (10 de Octubre de 2010). Recuperado el 25 de junio de 2011, de http://www.e-asfalto.com/orig_asf/origenasf.htm. Pág. 4
- Ing Alfonso Montejo Fonseca . (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. (segunda edición ed., Vol. 1). Colombia: Stella Valbuena de Fierro.
- Ing. Cira Piedrahita Céspedes, I. R. (2010). *Asiduidad del metodo universal de caracterizacion ligante (metodo ucl) para la seleccion del cemento asfaltico en mezclas asfalticas de alto modulo*. Universidad del cauca .
- Instituto del Asfalto. (1973). *Manual del Asfalto*. Maryland.
- Maxil Coyopotl, Roberto; Salinas Hernández, Marco Antonio. (2006). *Ventajas y Desventajas del Uso de Polimeros en el Asfalto*. Cholula, Puebla, Mexico.
- Miro Recasens, J. R., & Pérez Jiménez, F. E. (1994). *Aplicación del método cantabro a la caracterización de ligantes asfálticos: Método UCL*. Barcelona.
- Morales, C. A. (2007). *Análisis de la Metodología Superpave para el Diseño de Mezclas Asfálticas en México*. Puebla.
- Morales, M. R., & Alvarenga, E. R. (2010). *Selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en caliente en El Salvador*. San Salvador.
- (s.f.). N-CMT-4-05-001/00 Materiales para Pavimentos, Calidad de Materiales Asfálticos, SCT. Pág. 1.

Rioja V., H. (2007). *Suceptibilidad termica de ligantes basada en el desempeño real*. Santiago, Chile.

Rodriguez, Alejandro Padilla. (2000). *Mezclas Asfálticas* (Vol. I). España.

SANTIAGO GIL REDONDO Y VARIOS, Estudio de los Aditivos que permiten reducir la Viscosidad del Ligante a Elevadas Temperaturas, España.

SUPERPAVE Fundamentals Reference Manual, National Highway Institute.

Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile. (2001). *Tecnología del Asfalto Diplomado de Materiales, Escuela de Construcción Civil*. Chile.

Normas Citadas:

ASTM D36 / D36M-12 Método de prueba estándar para el Punto de reblandecimiento del betún (anillo y bola del aparato).

ASTM D2171 / D2171M - 10 Método de prueba estándar para la viscosidad de los asfaltos por viscosímetro capilar de vacío.

ASTM D5 - 06e1 Método de prueba estándar para la penetración de materiales bituminosos.

ASTM D92 - 12 Método de prueba estándar para puntos de inflamación y fuego por Cleveland Open Cup Tester.

ASTM C131 - 06 Método de prueba estándar para la resistencia a la degradación de pequeño tamaño agregado grueso por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles

norma ASTM D-1559 Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas compactadas.

Norma NLT 159/63 Método MARSHALL para mezclas asfálticas.

Norma NLT 159 Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall.

Norma NLT 352 Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste.

Norma NLT 149/72 Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de los ángeles.

AASHTO, A. A. (1993). *Design of Pavement Structures*. Washington D.C.

ANEXOS.

- A. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales. Período enero/1983 – diciembre/2002.
- B. Graficas de registros de Temperatura del pavimento en Zonas de Medición.
- C. Certificado de análisis de asfalto AC-20 y AC -30.
- D. Mapa de El Salvador especificando las zonas de medición de temperatura del pavimento asfaltico.

ANEXO A.

Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales.

Período enero/1983 – diciembre/2002.

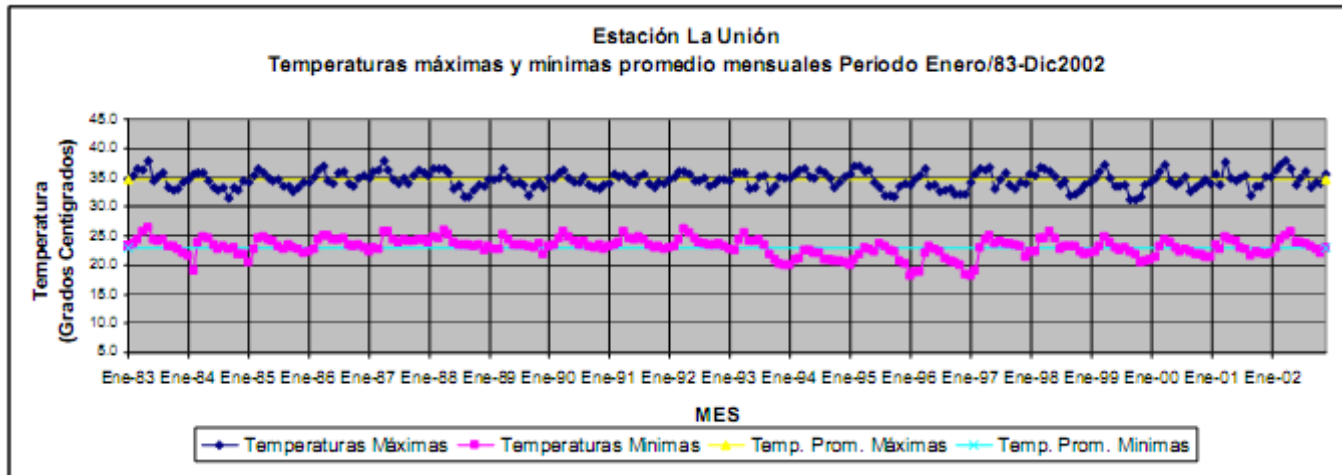


Figura A.1. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación La Unión.

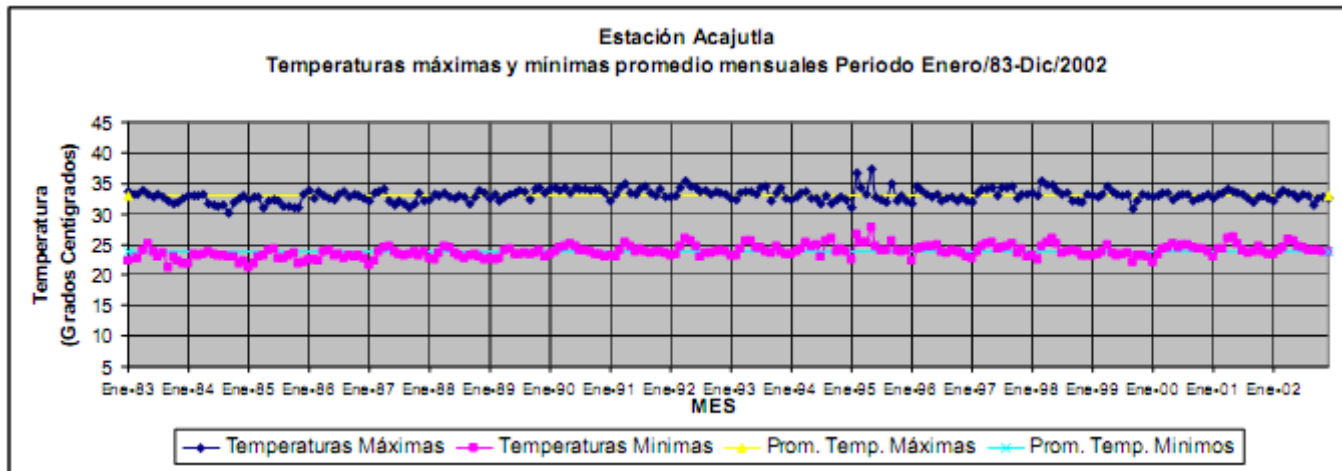


Figura A.2. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Acajutla.

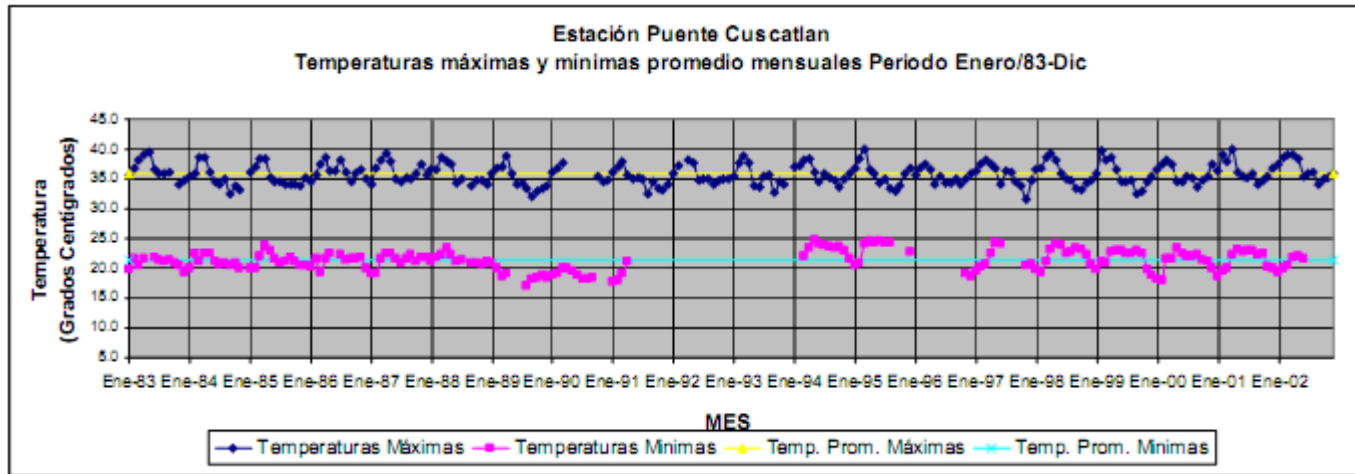


Figura A.3. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Puente Cuscatlán.

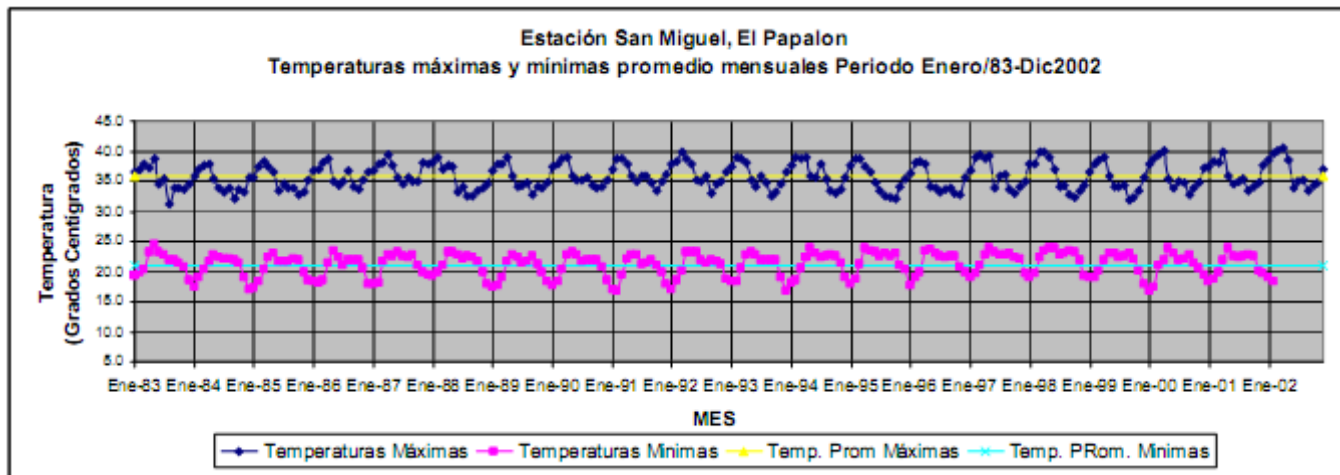


Figura A.4. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación San Miguel, El Papalón.

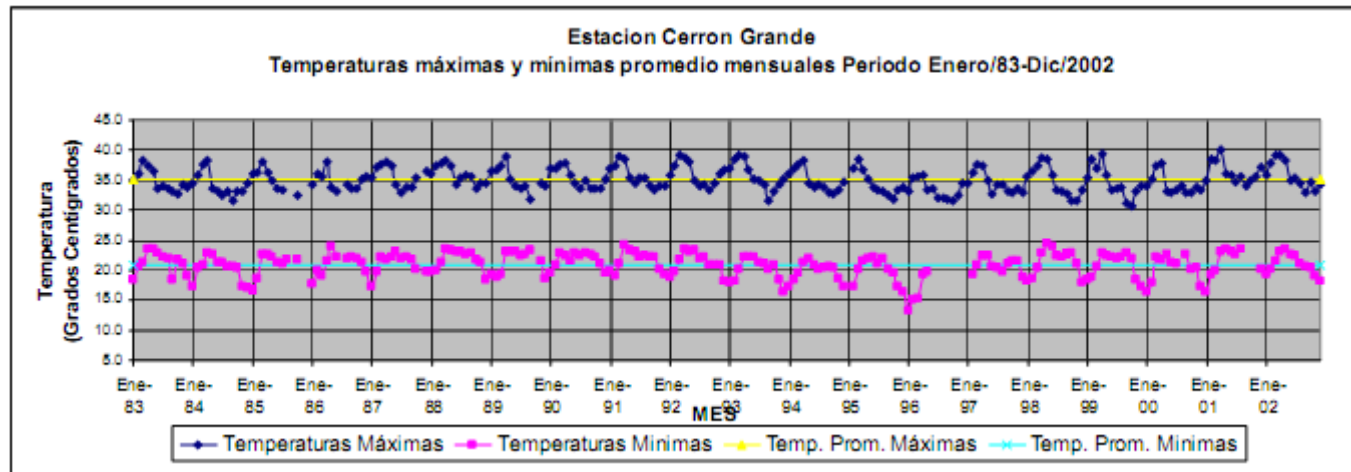


Figura A.5. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Cerrón Grande.

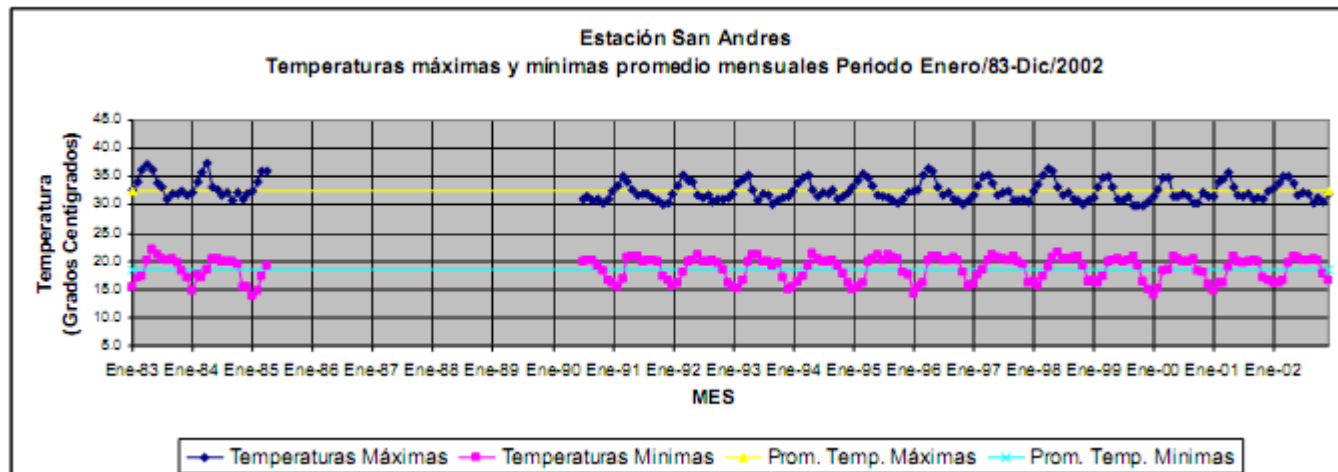


Figura A.6. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación San Andrés.

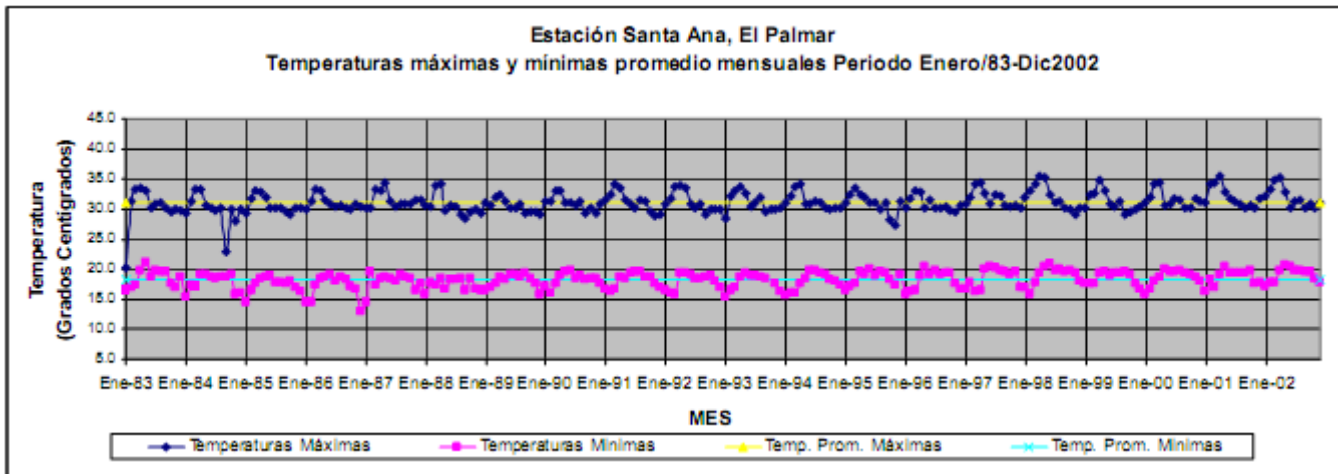


Figura A.7. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Santa Ana, El Palmar.

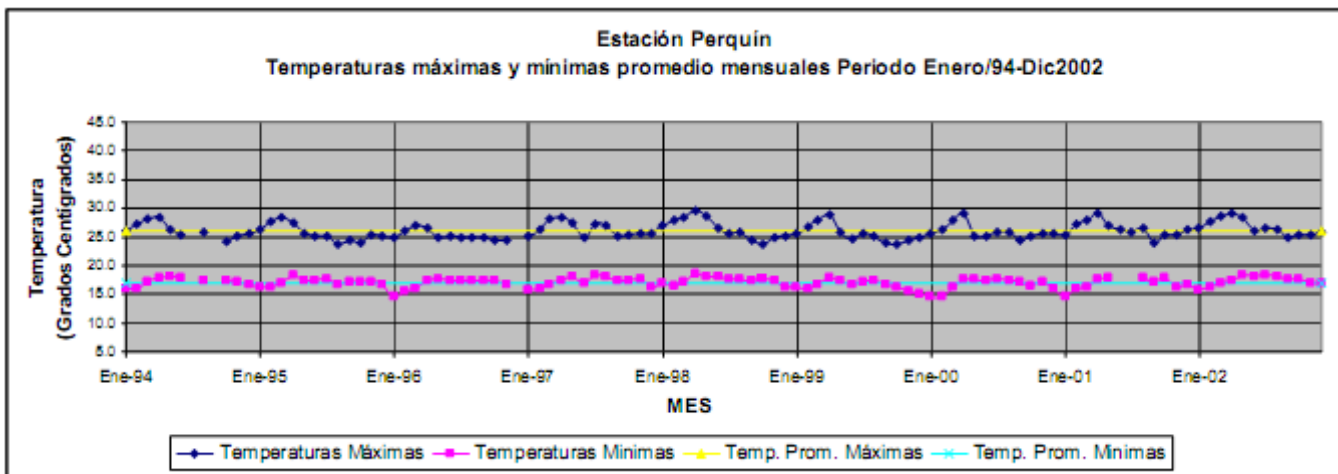


Figura A.8. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Perquin, Morazán.

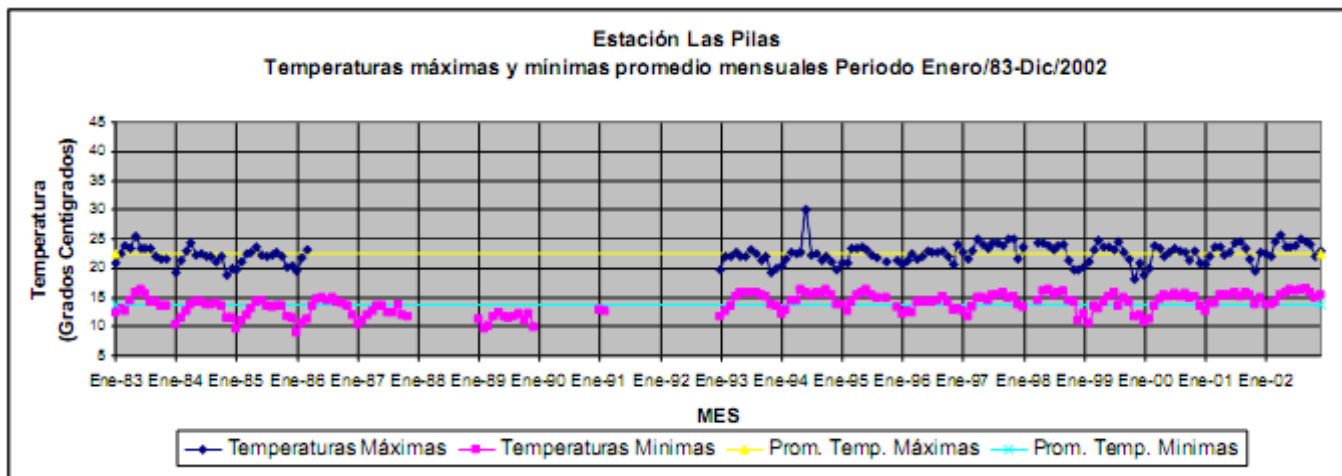


Figura A.9. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Las Pilas.

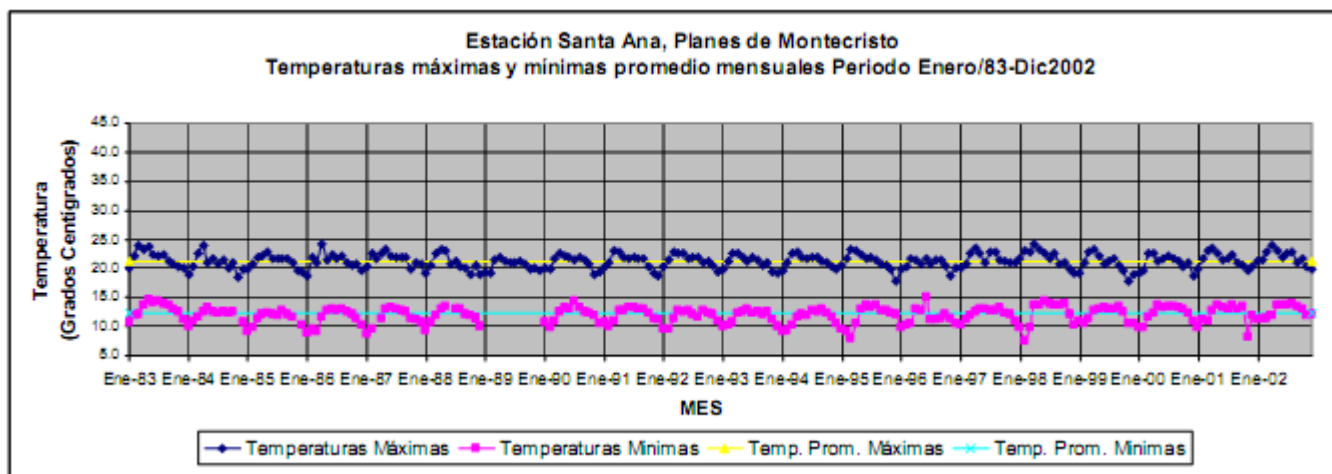
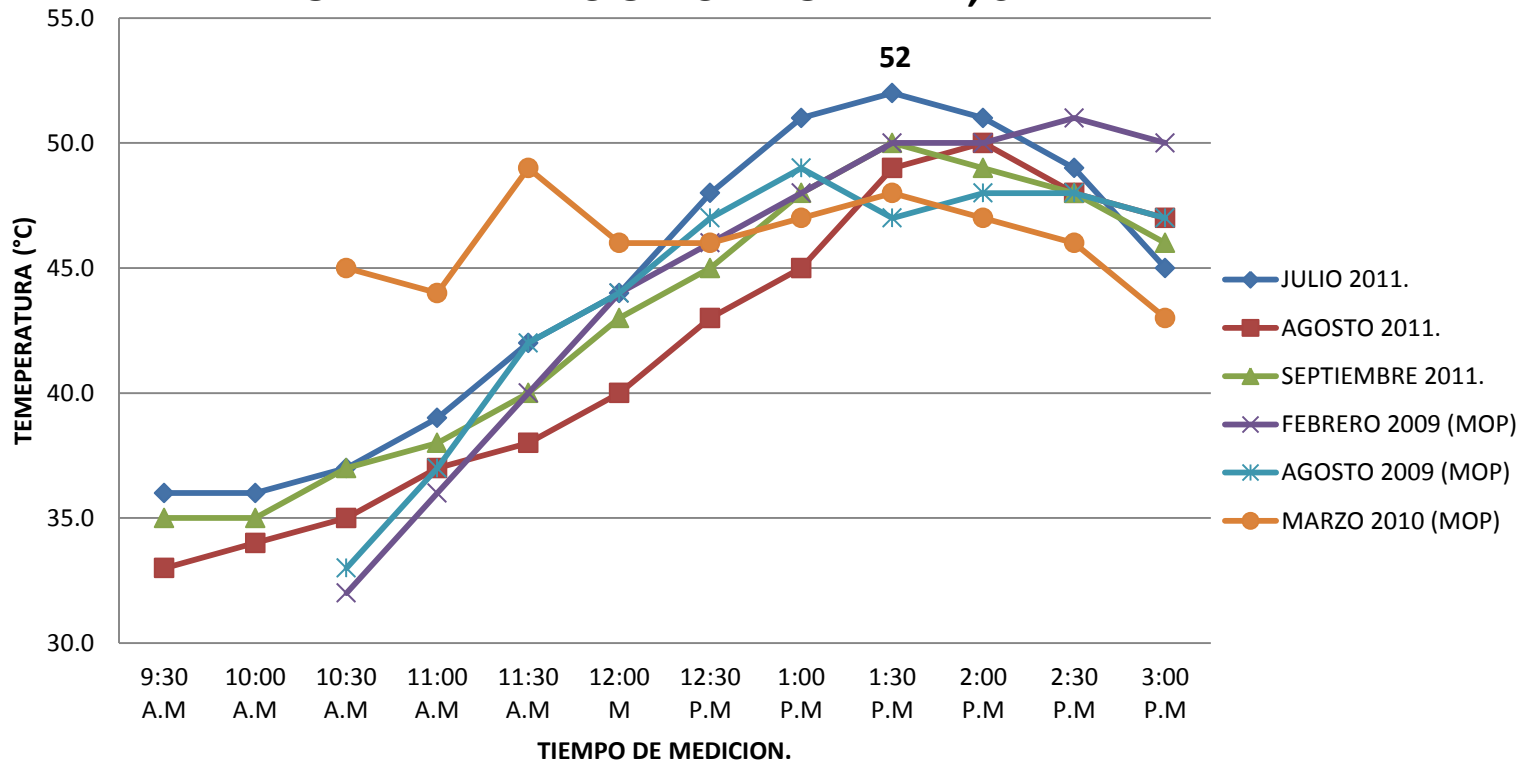


Figura A.10. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Santa Ana, Planes de Montecristo.

ANEXO B.

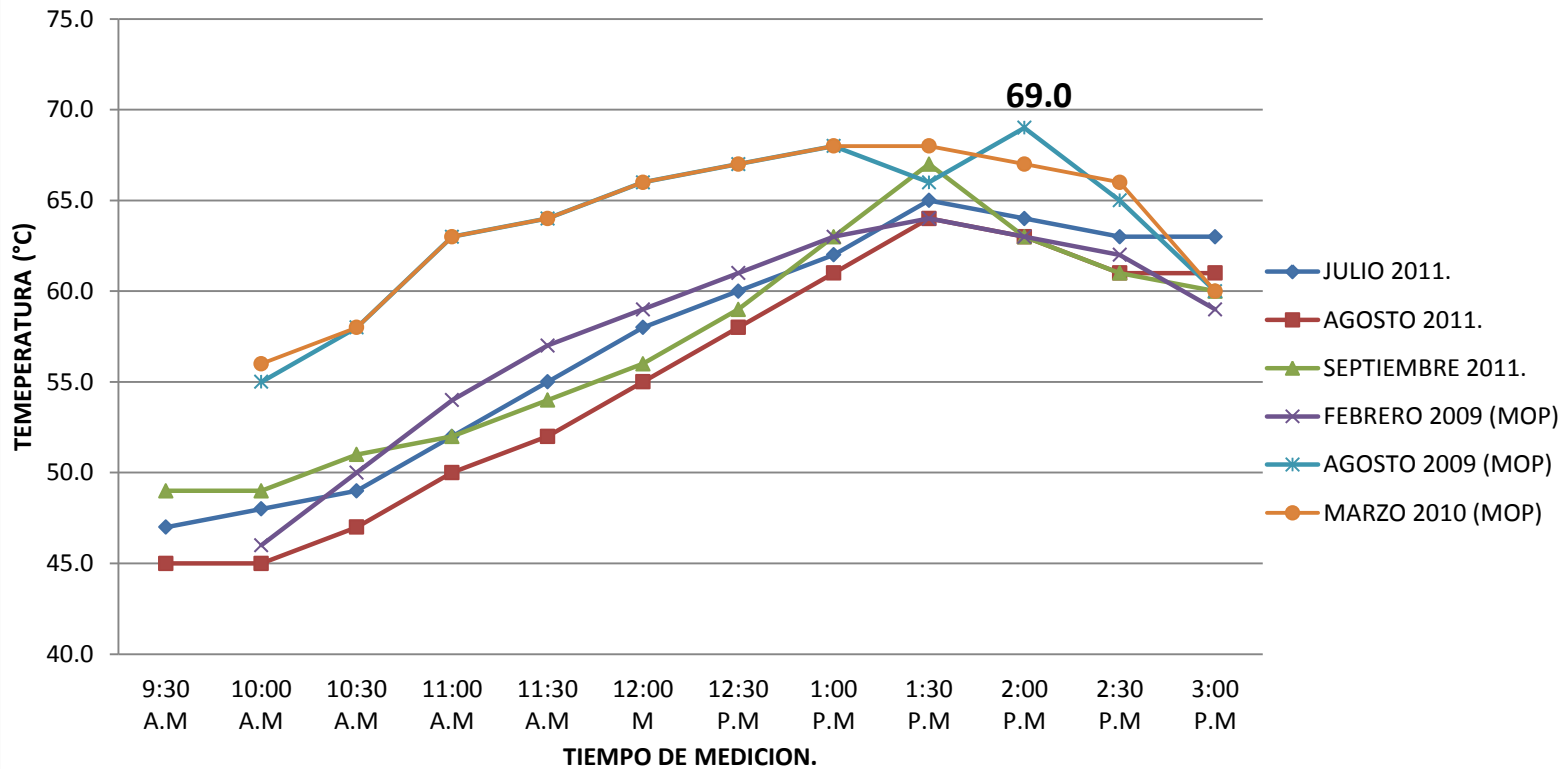
**Graficas de registros de Temperatura del pavimento en Zonas de
Medición.**

TEMPERATURA DE PAVIMENTO ZONA DE MEDICION CERRO VERDE, SANTA ANA

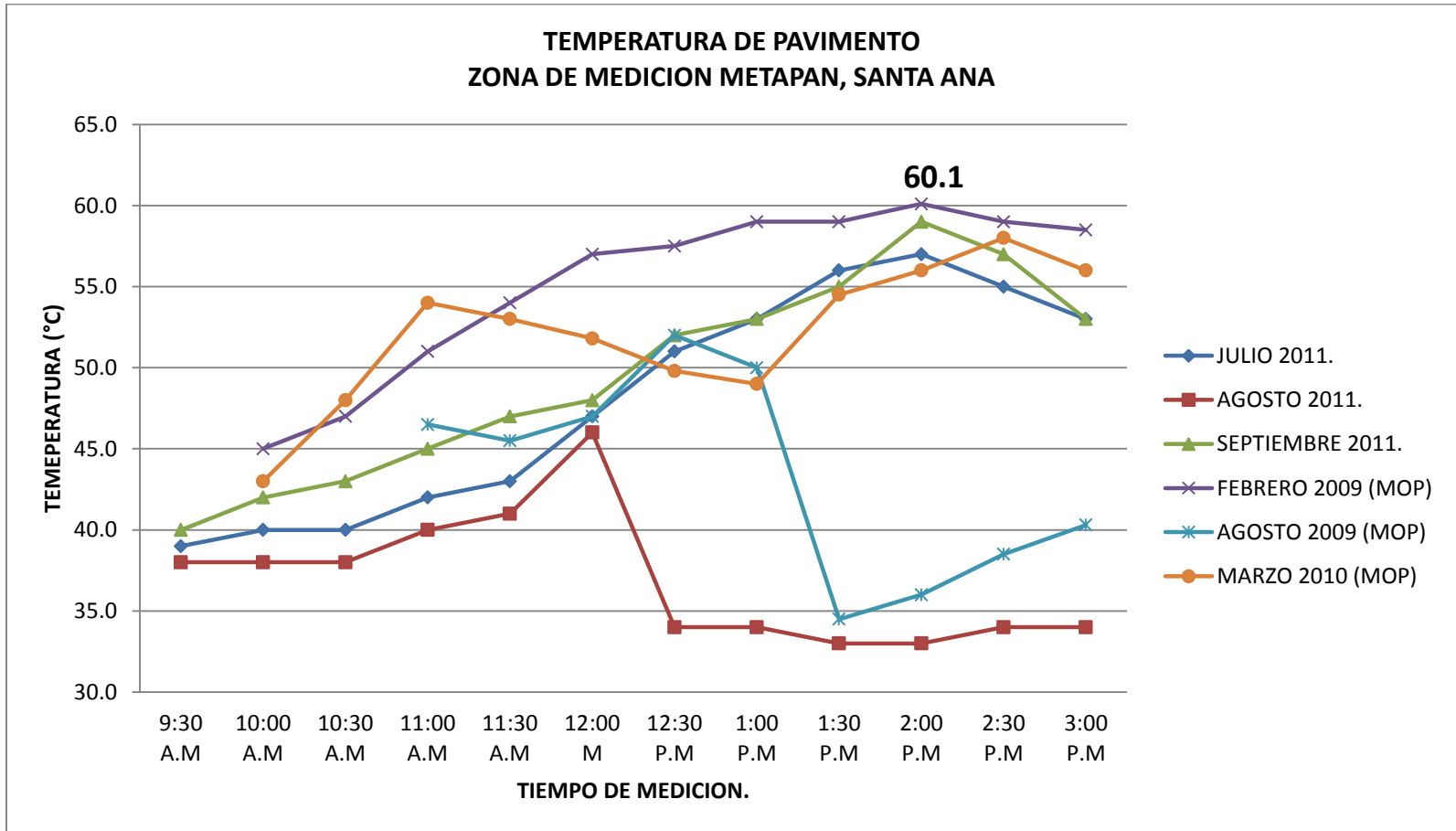


*Figura B.1. Registros de Temperaturas del Pavimento
Zona de Medición Cerro Verde, Santa Ana.*

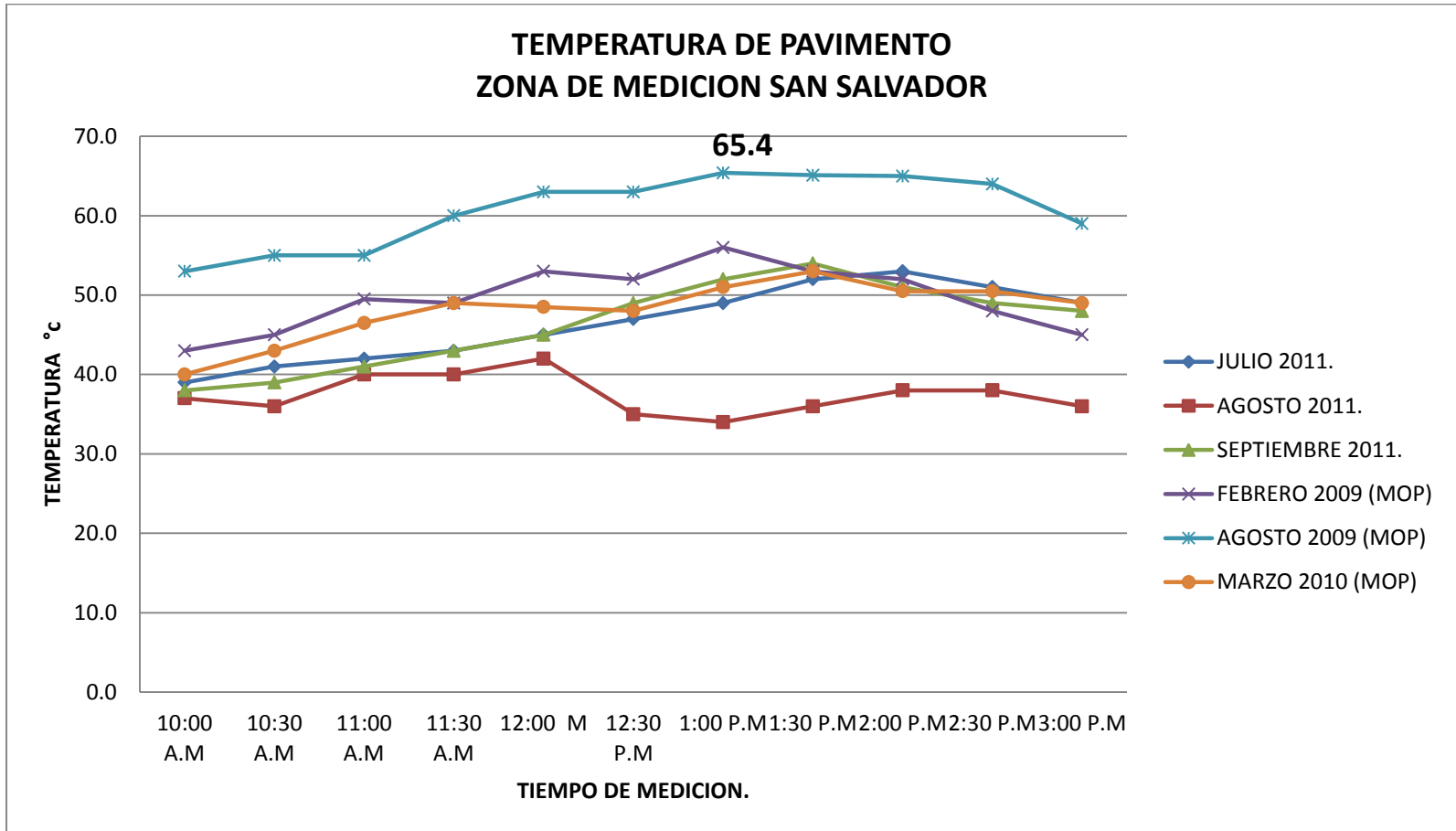
TEMPERATURA DE PAVIMENTO ZONA DE MEDICION ACAJUTLA, SONSONATE



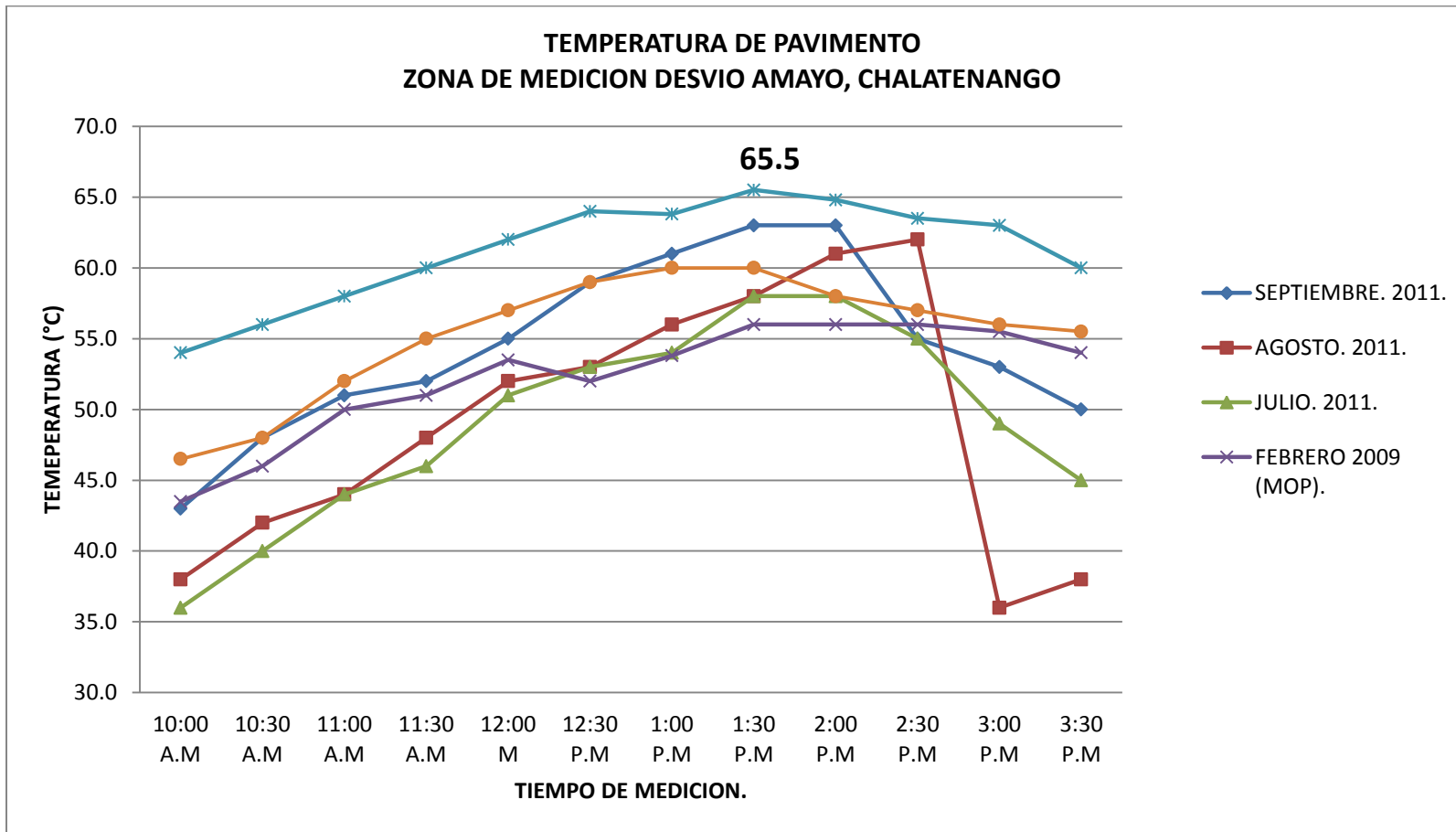
*Figura B.2. Registros de Temperaturas del Pavimento
Zona de Medición Acajutla, Sonsonate.*



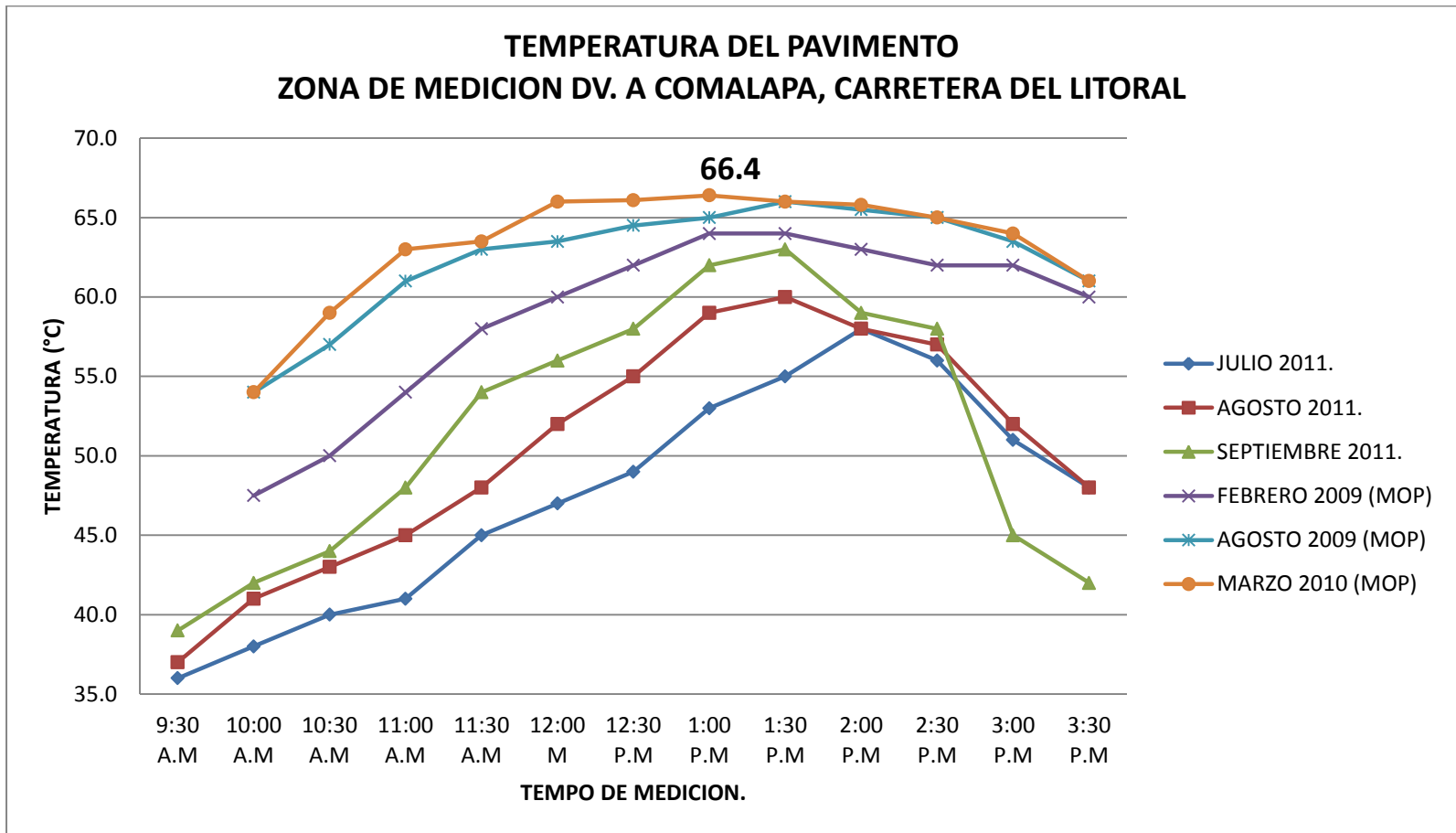
*Figura B.3. Registros de Temperaturas del Pavimento
Zona de Medición Metapan, Santa Ana.*



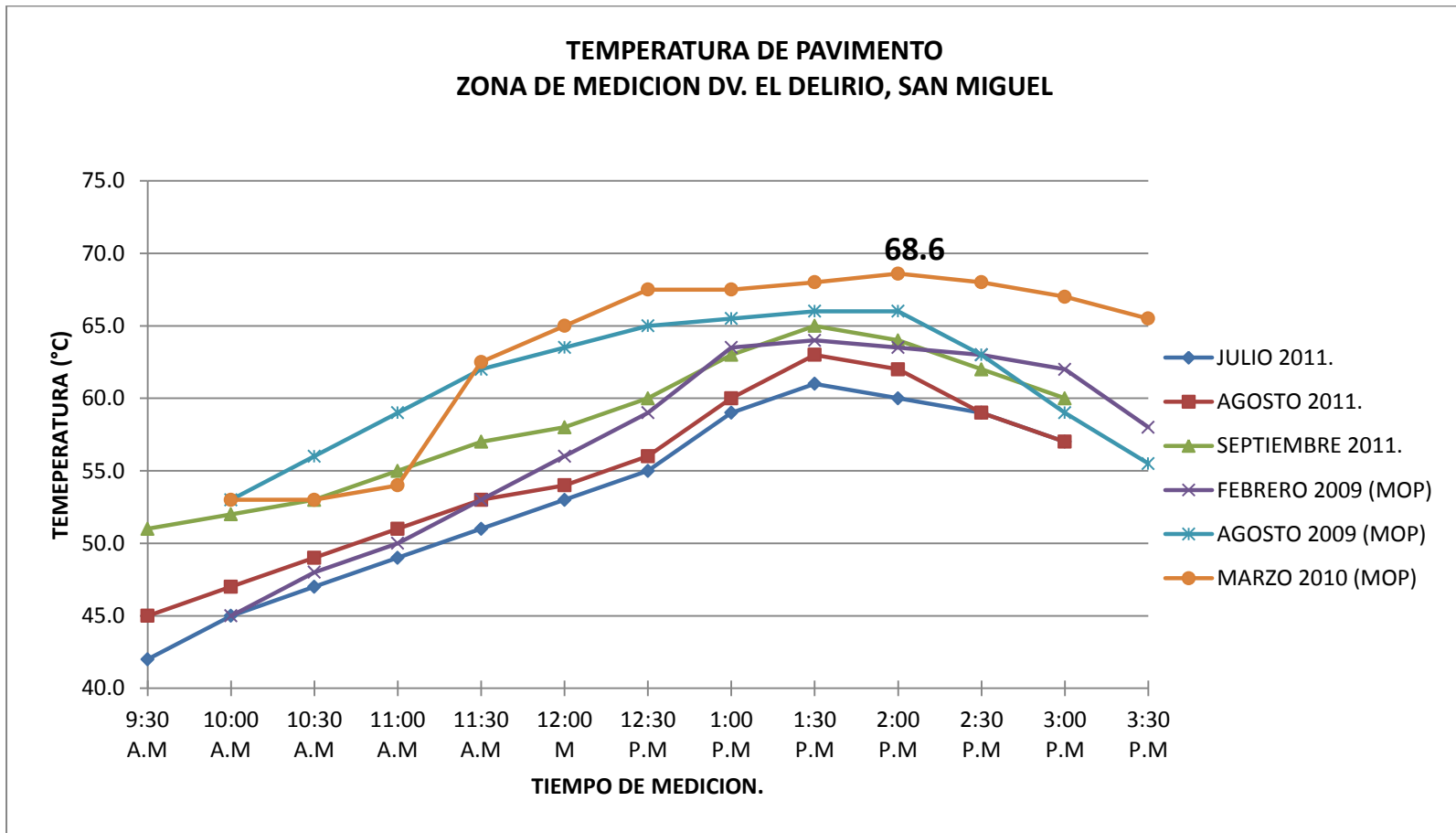
*Figura B.4. Registros de Temperaturas del Pavimento
Zona de Medición San Salvador.*



*Figura B.5. Registros de Temperaturas del Pavimento
Zona de Medición Desvío Amallo, Chalatenango.*



*Figura B.6. Registros de Temperaturas del Pavimento
Zona de Medición Desvió a comalapa, Carretera del litoral.*



*Figura B.7. Registros de Temperaturas del Pavimento
Zona de Medición Desvió el delirio, San Miguel.*

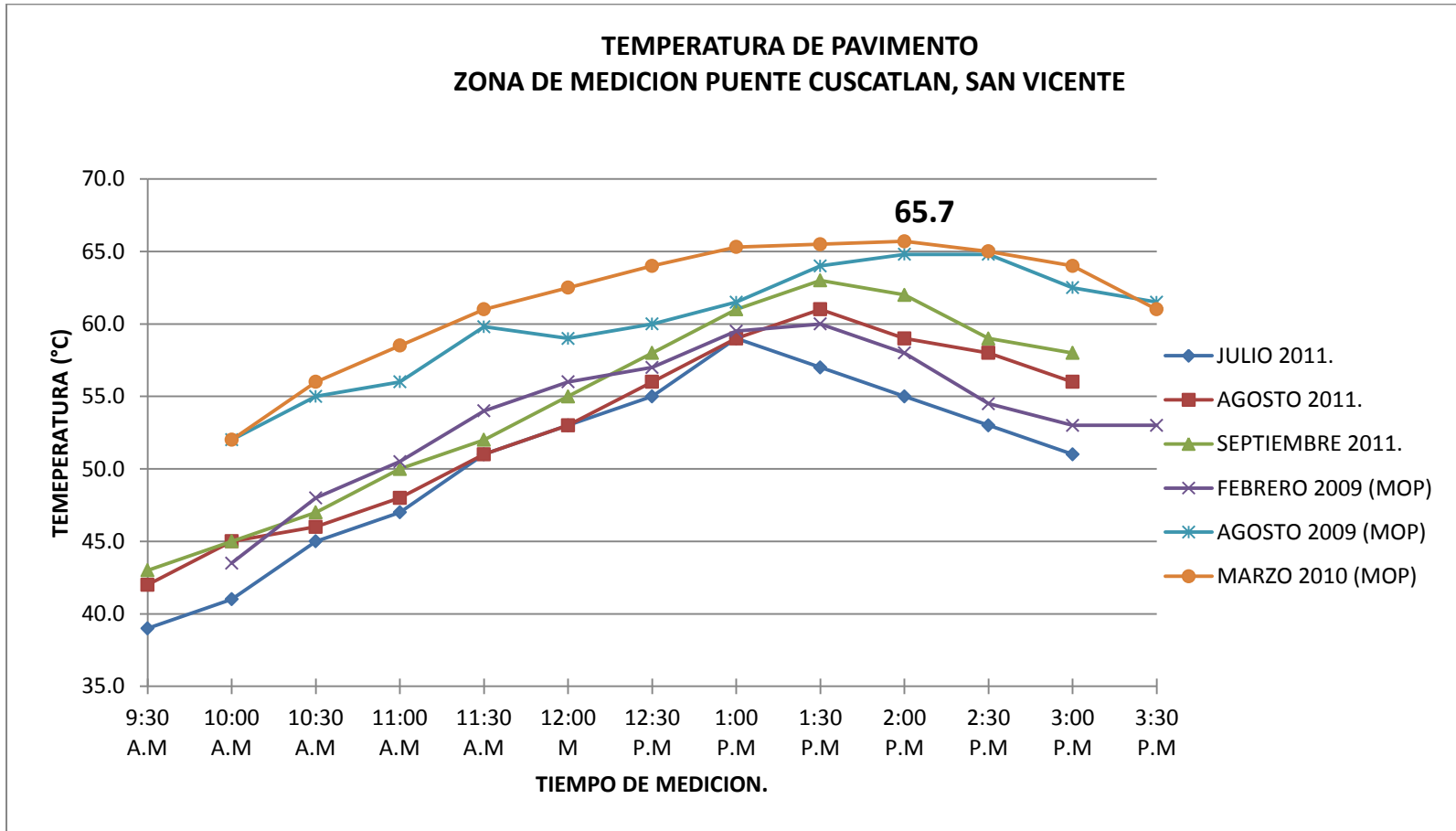
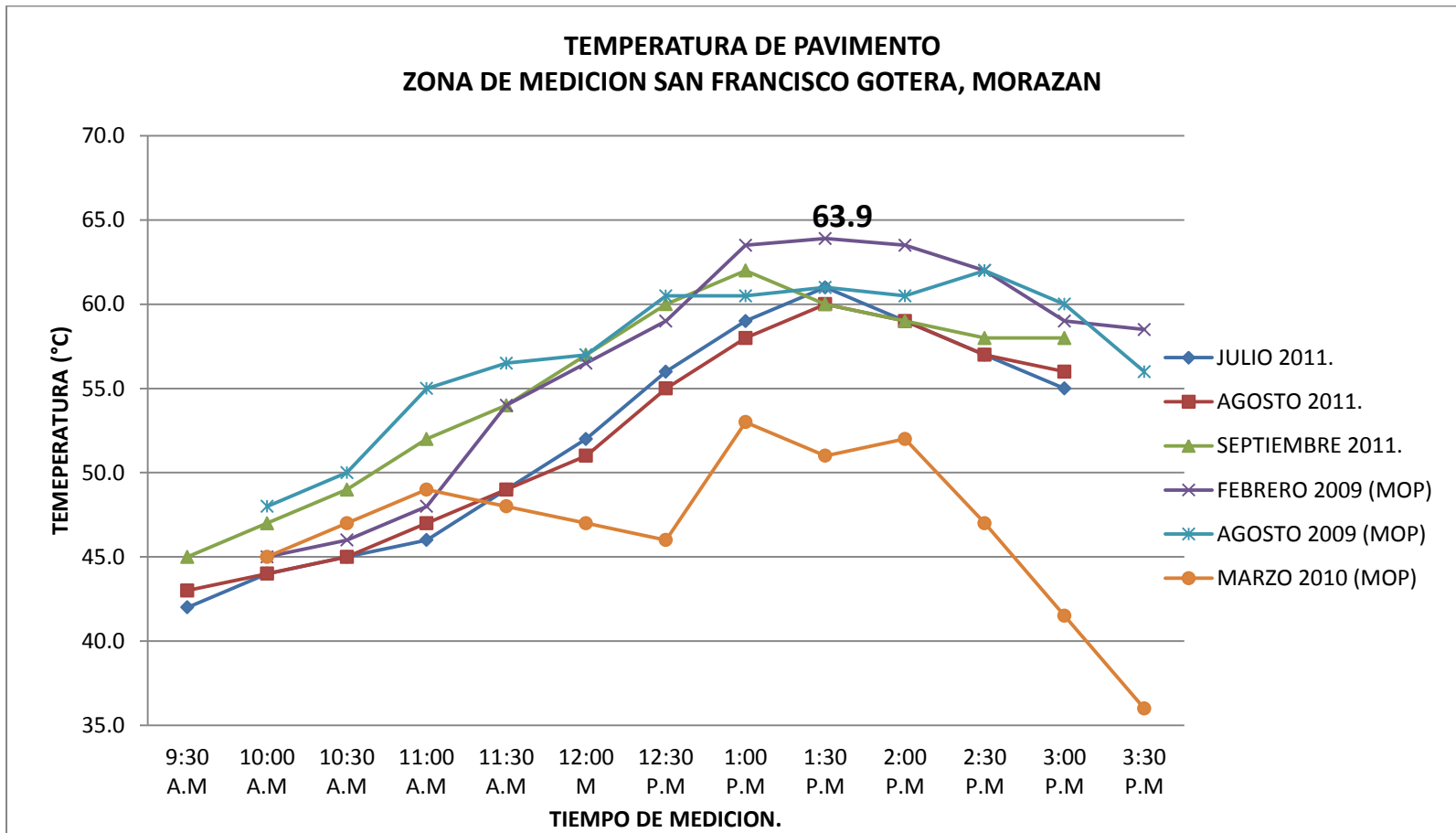


Figura B.8. Registros de Temperaturas del Pavimento
Zona de Medición Puente Cuscatlán, San Vicente.



*Figura B.9. Registros de Temperaturas del Pavimento
Zona de Medición San Francisco Gotera, Morazán.*

ANEXO C.

Certificado de análisis de asfalto AC-20 y AC -30.



REFINERIA PETROLERA ACAJUTLA, S.A. DE C.V.

**CERTIFICADO DE ANALISIS
ASFALTO AC-20**

(X0610 TABLE 1, ASTM D 3381)

Tanque N°	:	70	Batch N°	:	ASF-AC20-12-005
Fecha de Muestra	:	14-Feb-12	Fecha de Análisis	:	14-Feb-12
Volumen Bbls	:	9,592	Volumen Gls.	:	402,864

ANALISIS	METODO	RESULTADOS
Apariencia	ASTM	Homogenea
Gravedad Especifica a 60 °F	Visual	1.021
Flash Point (Cleveland Open Cup), °C	D 3289	302
Penetración a 25 °C, 100 g, 5s, mm/10	D 92	73
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	D 5	100.0
Viscosidad a 60 °C, poises	D 2042 (Nota 1)	1,937
Viscosidad Cinemática a 135 °C, cSt	D 2171	351
Pruebas después del Thin Film Oven Test (TFOT):	D 2170	
TFOT, Viscosidad a 60 °C, poises	D 1754, D 2171	6,950
TFOT, Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min, cm	D 1754, D 113	80

Nota 1: Este analisis es autorizado por Lab. Samia Canada

Certifico que los resultados proporcionados en la parte superior de este documento, cumplen con todos los métodos establecidos de analisis

Raquel Morales
Raquel Morales
Técnico Laboratorista

J. A. Zúñiga
Revisado por

14-02-X11

Figura C.1. Certificado rasa AC-20-12-005.

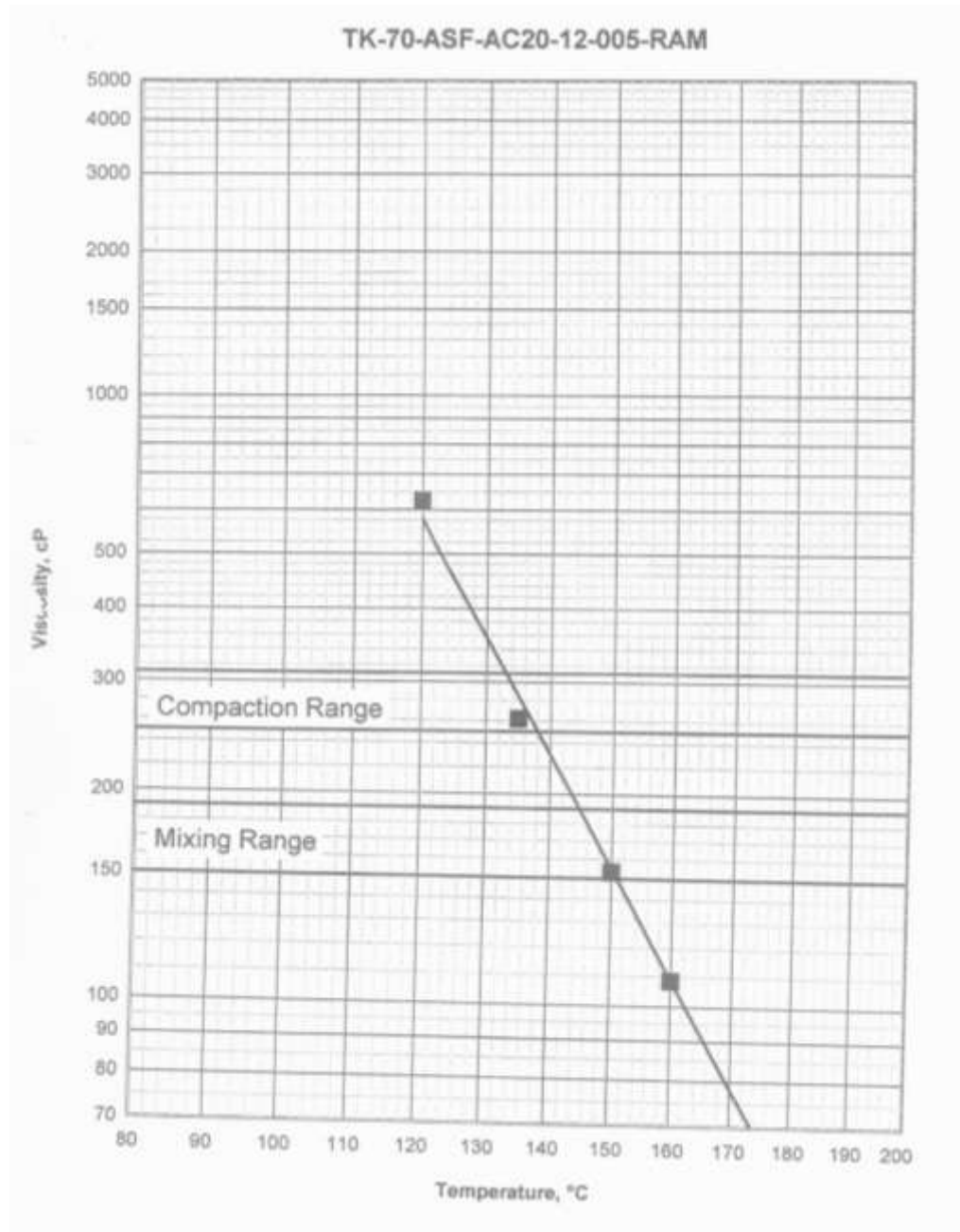


Figura C.2. Certificado RASA AC-20-12-005 Carta de Viscosidad.



REFINERIA PETROLERA ACAJUTLA, S.A. DE C.V.

**CERTIFICADO DE ANALISIS
ASFALTO AC-30**

(**TABLE 1 , ASTM D 3381**)

Tanque N°	: 73	Batch N°	: ASF-AC30-12-013 /
Fecha de Muestra	: 14-Mar-12 /	Fecha de Análisis	: 14-Mar-12
Volumen Bbls	: 4,356	Volumen Gis.	: 182,952

ANALISIS	METODO ASTM	RESULTADOS
Apariencia	Visual	Homogenea
Gravedad Especifica a 60 °F	D 3289	1.020 /
Flash Point (Cleveland Open Cup), °C	D 92	298
Penetración a 25 °C, 100 g, 5s, mm/10	D 5	65
Solubilidad en Tricloroetileno, % masa	D 2042	100.0
Viscosidad a 60 °C, poises	D 2171	2,998
Viscosidad Cinemática a 135 °C, cSt	D 2170	445
Pruebas después del Thin Film Oven Test (TFOT):		
TFOT, Viscosidad a 60 °C, poises	D 1754, D 2171	8,553
TFOT, Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min, cm	D 1754, D 113	49

Certifico que los resultados proporcionados en la parte superior de este documento, cumplen con todos los métodos establecidos de análisis

Roberto Echegoyen
Roberto Echegoyen

Coordinador de Aseguramiento de Calidad

Paquel Morales
Revisado por
14/3/12

Figura C.3. Certificado RASA AC30-12-013.

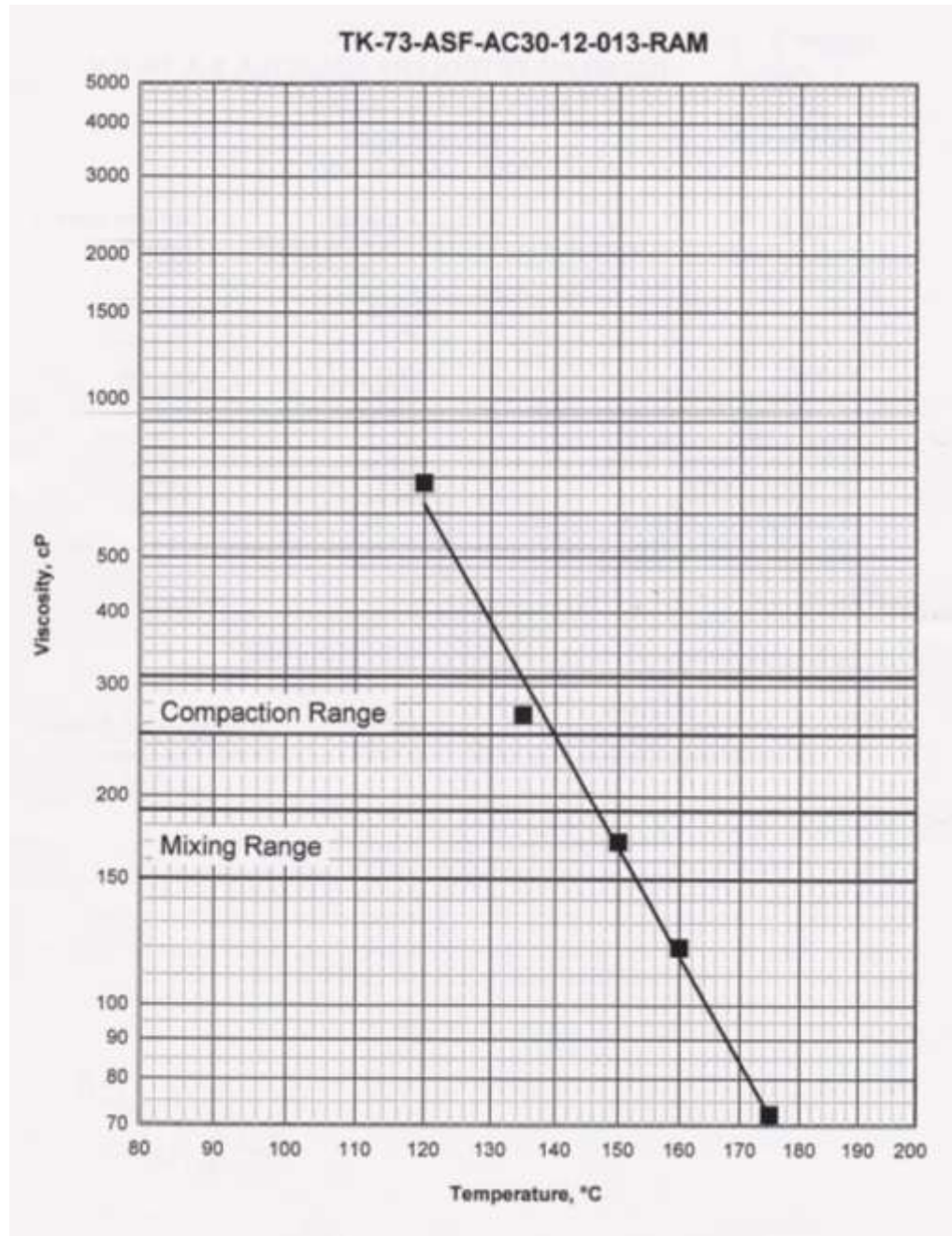


Figura C.4. Certificado RASA AC30-12-013 Carta de Viscosidad.

ANEXO D.

Mapa de El Salvador especificando las zonas de medición de temperatura del pavimento asfáltico.

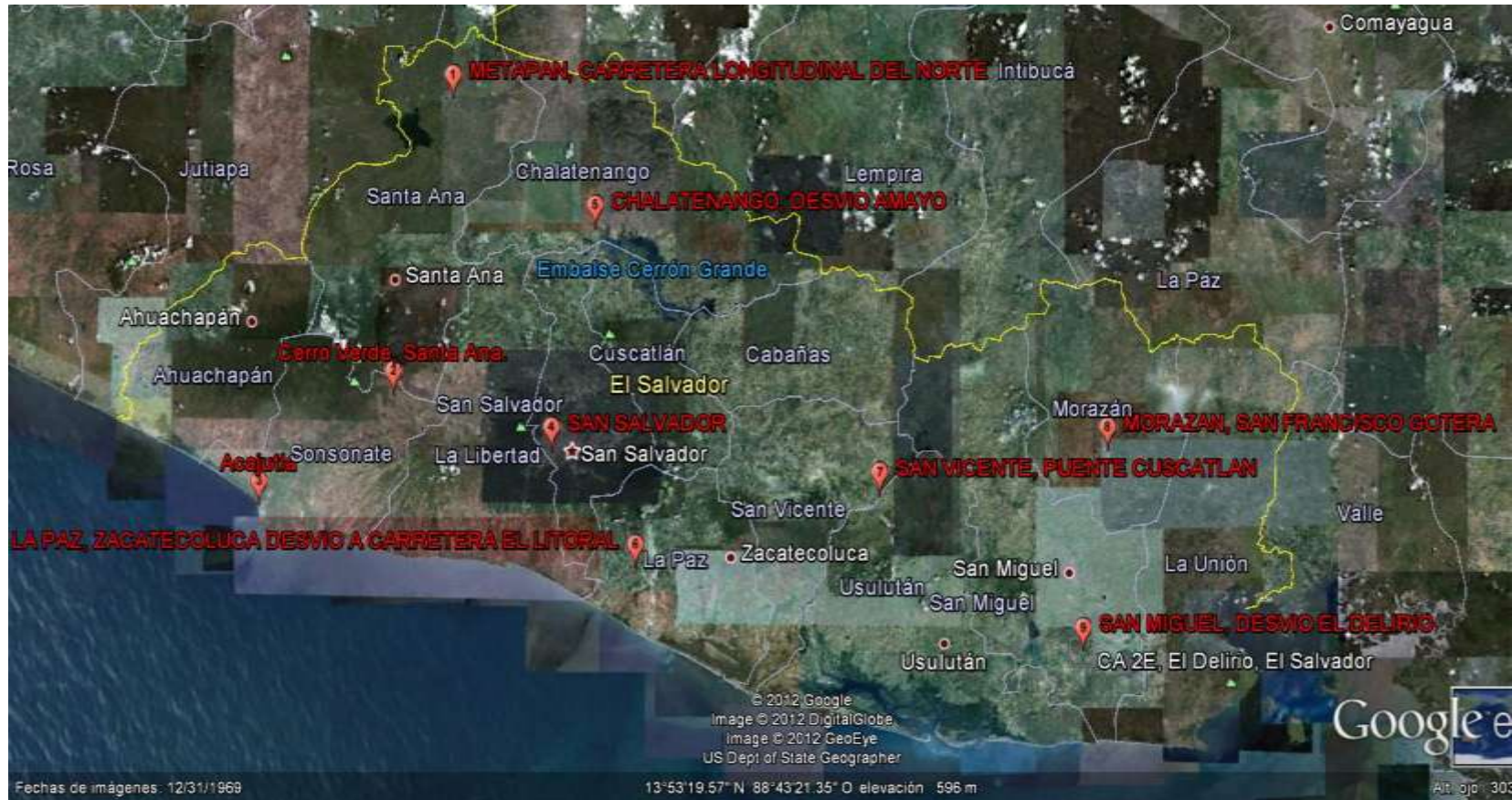


Figura D.1. Mapa de El Salvador especificando las zonas de medición de temperatura del pavimento asfáltico a 20mm de profundidad.