

VICEMINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO VIAL

SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFALTICO PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE EN EL SALVADOR

Elaborado por: María Renée Escobar Morales, Inga. Civil.
Unidad Técnica, Gerencia de Investigación y Desarrollo

Edwin Ricardo Alvarenga, Ing. Civil. Gerente de Investigación y Desarrollo.

Coordinador: Daniel Antonio Hernández Flores, Ing. Civil. Director.

OBSERVACIÓN

El contenido de este informe refleja las opiniones de los autores, quienes son responsables de los hechos y de la exactitud de los datos presentados. El contenido no refleja necesariamente las opiniones y políticas oficiales del Ministerio de Obras Públicas, Transporte y de Vivienda y Desarrollo Urbano de El Salvador. Este informe no constituye una norma, especificación o regulación.

INDICE

ITEM	CONTENIDO	PAGINA
	Resumen	4
1.0	Introducción	4
2.0	Aspectos generales sobre el asfalto.	5
2.1	Origen del asfalto	5
2.2	Principales propiedades físicas del asfalto.	9
2.3	Sistemas de clasificación del cemento asfáltico.	10
3.0	Metodologías utilizadas para la selección del cemento asfáltico para	20
	producir mezclas asfálticas en caliente.	
3.1	Método de SUPERPAVE.	20
3.2	Método del Instituto del Asfalto.	22
3.3	Método del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América	23
4.0	Selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas	s 25
	en caliente en El Salvador.	
4.1	Análisis de registros históricos de temperatura del aire, período 1983 - 2002.	- 25
4.2	Análisis de registros de temperatura superficial del pavimento, período	28
	febrero 2009 – marzo 2010	
4.3	Análisis de resultados de ensayos de laboratorio en cementos asfálticos.	32
5.0	Conclusiones y Recomendaciones.	34
6.0	Referencias.	35
Anexo		
A.	Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales. Período enero/1983 – diciembre/2002.	8 A-1
B.	Registros de Temperatura del pavimento en Zonas de Medición	B-1
C.	Mapa de elevaciones de El Salvador con clasificación de regiones de acuerdo al Método del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América y del Instituto del Asfalto.	

SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFALTICO PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE EN EL SALVADOR.

RESUMEN.

En vista que los cementos asfálticos presentan una alta susceptibilidad a la temperatura, el comportamiento de las capas de rodadura construidas con mezcla asfáltica, se ven influenciadas considerablemente por las condiciones climáticas a las que están expuestas. Por lo anterior, es importante seleccionar un cemento asfáltico que posea las propiedades adecuadas respecto a las condiciones climáticas existentes, sin olvidar que el buen desempeño de la capa de rodadura de mezcla asfáltica no depende únicamente de la adecuada selección del cemento asfáltico sino que intervienen entre otros, las características de los agregados pétreos, los procesos de producción de la mezcla asfáltica, los procesos constructivos incorporados en la colocación de la carpeta y, las solicitaciones de carga.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene como objeto determinar el tipo de cemento asfáltico para la producción de mezclas asfálticas en caliente en El Salvador. En la investigación, se han considerado las recomendaciones establecidas por organismos internacionales para la selección del cemento asfáltico, los cuales se fundamentan en las condiciones climáticas de una región; para lo cual se ha utilizado entre otros, registros históricos de temperaturas ocurridas en el país y su correlación con las propiedades físicas de los diferentes cementos asfálticos comúnmente utilizados en proyectos de carreteras desarrollados en nuestro país.

1.0 INTRODUCCIÓN.

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.

La investigación esta basada principalmente en las recomendaciones del Instituto del Asfalto y del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, las cuales consideran los registros históricos de temperaturas ambiente ocurridas en la zona y su correlación con las propiedades físicas de los diferentes cementos asfálticos. En los apartados que se presentan a continuación se indican generalidades relacionadas con el asfalto, las metodologías existentes para la selección del tipo de cemento asfáltico para la producción de mezcla asfáltica y los resultados obtenidos dentro del marco del proyecto de investigación antes referido.

2. ASPECTOS GENERALES SOBRE EL ASFALTO.

2.1 ORIGEN DEL ASFALTO.

En general, el asfalto es un cementante que ha sido utilizado desde hace muchos siglos en actividades de obras civiles, entre éstos la construcción de carreteras. Al respecto, arqueólogos han documentado el uso de asfaltos como un adhesivo o material impermeabilizante en el Valle de Eufrates cuatro mil años antes de Cristo, el uso de asfalto en Babilonia durante el reinado de Nabucodonosor, así como el uso de dicho material por Griegos y Romanos¹. A continuación se presentan aspectos generales sobre dicho material cementante, que permiten comprender con mayor facilidad su desempeño en carreteras, bajo condiciones normales de servicio.

El asfalto, según la American Society for Testing and Materials (ASTM)², es un material cementante color café oscuro a negro, en el cual los constituyentes predominantes son los bitumen los cuales existen en la naturaleza o son obtenidos por el procesamiento del petróleo. Asimismo la ASTM define bitumen como una clase de sustancia cementante negro o color oscuro (sólido, semisólida o viscoso), natural o manufacturado, compuesto principalmente de hidrocarbonos de alto peso molecular, de los cuales asfaltos, alquitrán, brea y asfaltita son típicos. La mayoría de asfaltos utilizados actualmente en pavimentos asfálticos, provienen del proceso de destilación de crudos (petróleo) y solo una pequeña cantidad proviene de fuentes naturales, tal como el Lago de Asfalto en la Isla Trinidad (fotografía 2.1) o los yacimientos de asfalto de Val de Travers en Suiza y el yacimiento de Seyssel en el valle de Ródano, Francia.



Figura 2.1 Lago de Asfalto Trinidad.

² ASTM D 8 Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements.

¹ SHRP, Asphalt Research Program Technical Memorandum # 4

Es importante señalar que no todos los petróleos son idóneos para la producción de asfalto. De acuerdo con lo indicado en el documento *Review of Advances in Grading systems for asphalt binders in hot mix asphalt pavements, Ademila and Olutaiwo, University of Lagos, Akoka, Nigeria*, a partir del valor de Indice de Gravedad API³ es posible estimar de manera general el rendimiento de producción de asfalto de un petróleo, de tal manera que de un crudo que posea un bajo valor de Indice de Gravedad API se puede obtener una mayor cantidad de asfalto, ya que posee una mayor cantidad de bitumen. El valor de Indice de Gravedad API, es obtenido con base en la gravedad específica del crudo a 15°C, dicho índice se determina a partir de la siguiente expresión:

Indice de Gravedad API: (141.5 / Gravedad Específica) - 131.5

Los crudos son clasificados como ligeros, medianos o pesados, de acuerdo al valor de API. Los crudos ligeros poseen valores de API mayores a 31.1; Crudos medios entre 22.3 y 31.1; y Crudos pesados, tienen un valor de API abajo de 22.3. A continuación se presentan valores típicos de Indice de gravedad API.

Valores típicos de Gravedad API						
Systemaia	Valor de Indice de					
Sustancia	Gravedad API					
Agua	10					
Gasolina	55					
Petróleo Boscan(Venezuela)	10.1					
Petróleo Arabe Pesado	28.2					
Petróleo Nigeria Ligero	38.1					

Tabla 2.1 Valores típicos de Indice de Gravedad API

Fuente: Adaptado de Washington Department of Transportation. (WSDOT)

El asfalto es producido por destilación fraccional del crudo extraído de los pozos petroleros, a partir de procesos realizados en una refinería. Usualmente la destilación es realizada en dos pasos, el primero es calentar el crudo hasta una temperatura entre 300°C y 350°C e introducido en una torre de destilación atmosférica; las fracciones ligeras como nafta, kerosene y gas son separados del crudo a diferentes alturas de la torre y las fracciones pesadas llegan al fondo de la misma. Posteriormente dichos residuos son calentados entre 350°C y 400°C e introducidos en una torre de destilación con presión reducida (torre de vacío), con el objeto de obtener los componentes volátiles que aún queden remanentes; los residuos obtenidos de este segundo proceso, localizados al fondo de la torre, constituye la materia prima para la producción del asfalto.

En el documento Health Effect of Ocuppational Exposure to Asphalt, National Institute for Occupational Safety and Health del U.S. Department of Health and Human Services, se indica que otros procesos de manufactura comúnmente utilizados incluyen la Precipitación por solvente, Flujo de aire; o la mezcla de asfaltos o crudos procedentes de diferentes fuentes, otros. Es

٠

³ API: American Petroleum Institute

importante señalar que el proceso de fabricación incide en el comportamiento del asfalto, para el caso, al utilizar el procedimiento de Precipitación por Solvente resulta un asfalto muy duro, el cual es menos resistente a cambios de temperatura; al utilizar el procedimiento de flujo de agua se obtiene un asfalto más suave. A continuación, en la figura 2, se presenta un esquema típico del proceso de refinación del petróleo.

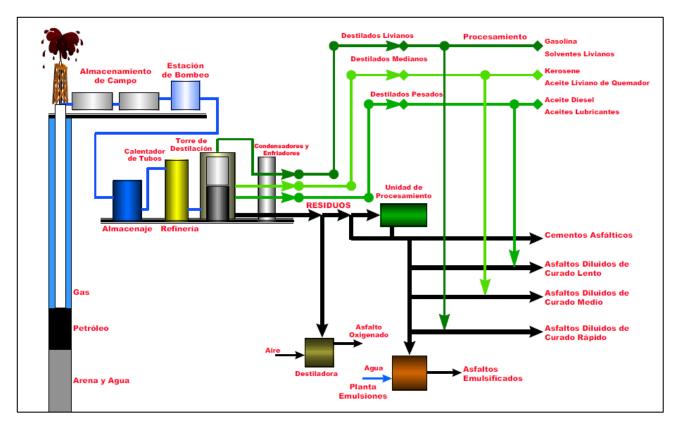


Figura 2.2 Esquema de Proceso Típico de Refinación del Petróleo. Fuente: Tecnología del Asfalto, Diplomado de Materiales, Escuela de Construcción Civil, Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile

Tal como se ha indicado anteriormente, las propiedades de los cementos asfálticos dependen del proceso de producción; sin embargo, el comportamiento de los mismos también esta relacionado con la composición química del bitumen de origen. Con base en lo indicado en el documento SHRP Asphalt Research Program Technical Memorandum # 4, los asfaltos están constituidos predominante por moléculas de carbonos e hidrógenos, entre 90% y 95%, de ahí la denominación de **hidrocarburos**; el porcentaje remanente consiste de **Heteroátomos** (denominados así debido a que pueden reemplazar los átomos de carbono en la estructura molecular del asfalto), constituidos por azufre, nitrógeno y oxígeno, así como también **Metales**, tales como vanadio, níquel y hierro, los cuales constituyen menos del 1%. A continuación se presenta información sobre los componentes de asfaltos procedentes de diferentes crudos. En la tabla 2.2 se presentan algunos componentes de asfaltos.

	Procedencia del Crudo									
Composición	Mexican Blend	Arkansas	Boscan Venezuela	California						
Carbono	83.77	85.78	82.90	86.77						
Hidrógeno	9.91	10.19	10.45	10.93						
Nitrógeno	0.28	0.26	0.78	1.10						
Azufre	5.25	3.41	5.43	0.99						
Oxígeno	0.77	0.36	0.29	0.20						
Vanadio, ppm	180.00	7.00	1380.00	4.00						
Niquel, ppm	22	0.40	109.0	6.00						

Tabla 2.2. Componentes de asfalto.

Fuente: Adaptado de Viscoelastic modeling of straight and modified binders at intermediate and high temperatures de Mostafa A. Elseifi.

Los hidrocarburos, heteroátomos y metales, antes referidos, forman en el asfalto una amplia gama de diferentes moléculas, las cuales pueden agruparse en tres grandes grupos: **Alifáticos** (o parafínicos), **Nafténicos** (o cíclicos) y **Aromáticos**. En el estudio químico del asfalto, se han utilizado métodos de precipitación por solvente, con base en lo cual se considera que los asfaltos están constituidos por **Asfaltenos** de alto peso molecular, dispersos o disueltos en un medio aceitoso de bajo peso molecular denominados **Maltenos**. Los maltenos a la vez, pueden subdividirse en Resinas, Aromáticos y Saturados. A continuación se presentan aspectos generales de cada uno:

- Asfaltenos. De acuerdo a ASTM D 8, Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements, los asfaltenos son las fracciones de hidrocarbono de alto peso molecular precipitadas del asfalto por un solvente nafta-parafínico a una especificada relación asfalto-solvente, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito, estos le dan el color y dureza al asfalto.
- **Resinas**. Las resinas son por lo general líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, proporcionan las cualidades adhesivas en el asfalto.
- **Aromáticos.** Los aromáticos (aromáticos nafténicos) son débilmente polares, éstos sirven como un medio dispersante para los asfaltenos.
- Saturados. De acuerdo a ASTM D 8, los saturados son una mezcla de hidrocarbonos parafínicos y nafténicos que en percolación en un solvente parafínico no son adsorbidos en el medio; otros compuestos tales como aromáticos nafténicos y polares, son adsorbidos de tal manera que permiten la separación de la fracción saturada.

Es importante tomar en consideración que las propiedades de los asfaltos están relacionada con la proporción de maltenos y asfaltenos. Sin embargo, también debe considerarse que dicha proporción puede variar en el tiempo, por efecto de altas temperaturas, exposición a la luz solar y oxígeno, otros; lo cual incide considerablemente en el desempeño del asfalto en la etapa de servicio.

2.2 PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO.

A continuación se presentan algunas de las propiedades físicas del asfalto⁴, las cuales tienen una incidencia considerable en la producción, colocación y desempeño de la mezcla asfáltica, empleada en la construcción de la capa de rodadura de una estructura de pavimento.

- **Durabilidad:** Es la capacidad del asfalto para mantener sus características originales, por efecto de procesos normales de degradación.
- Adhesión y Cohesión: Adhesión, es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla asfáltica y Cohesión, es la capacidad del asfalto de mantener firmemente en su lugar las partículas del agregado que constituye la mezcla asfáltica de la estructura del pavimento.
- Susceptibilidad a la temperatura: Los asfaltos son materiales termoplásticos, por lo que su consistencia depende de la temperatura a la cual se encuentran así como del tiempo de exposición; por ejemplo, un asfalto puede presentar un mismo comportamiento si se expone una (1) hora a 60°C como al exponerlo diez (10) horas a 25°C⁵. En climas calientes o bajo cargas sostenidas, los cementos asfálticos se comportan como líquidos viscosos y fluyen.

La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleos de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia. Una forma de cuantificar la susceptibilidad a la temperatura es a través de la curva viscosidad–temperatura (V–T), en la cual se puede evaluar el comportamiento de los asfaltos a diferentes temperaturas. También existe un parámetro denominado Indice de Penetración (IP), el cual se obtiene a partir del valor de Penetración del asfalto a 25°C, determinado según la norma ASTM D 5 Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, y el Punto de ablandamiento, determinado según la norma ASTM D 36 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). La determinación del valor de Indice de Penetración, puede llevarse a cabo a través de la siguiente expresión:

$$IP= (20)* (1-25A) / (1+50A)$$

A= $(\log (\text{pen at } 25^{\circ}\text{C}) - \log 800) / (25\text{-Punto de Ablandamiento})$

• Endurecimiento y Envejecimiento: El asfalto tiende a perder sus características de elasticidad con el tiempo, a consecuencia de diferentes factores externos, principalmente por efecto del proceso de oxidación, el cual es más severo durante la producción de la mezcla asfáltica en caliente debido a que durante dicho proceso el asfalto se ve expuesto a altas temperaturas y se encuentra en capas delgadas. Posteriormente continúa el proceso de envejecimiento, por efecto de las condiciones medioambientales en el sitio de emplazamiento final de la mezcla asfáltica.

9

⁴ Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, Asphalt Institute.

⁵ Superpave Fundamentals Reference Manual, National Highway Institute

2.3 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO.

La clasificación de los cementos asfálticos, ha girado alrededor de las propiedades físicas de los mismos, determinados a través de métodos de ensayos que en su mayoría son empíricos; lo anterior, principalmente debido a la complejidad y variabilidad de las propiedades o características químicas de los asfaltos. Los sistemas tradicionalmente utilizados para la clasificación de los asfaltos corresponden a: 1) Sistema de Clasificación por Penetración y 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), del cual más adelante se abordarán algunos aspectos relacionados con dicha metodología.

A continuación se presenta aspectos generales sobre cada uno de los ensayos utilizados para la clasificación de los cementos asfálticos, mediante los sistemas tradicionales, con base en aspectos indicados principalmente en los documentos *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*, Asphalt Institute y *Vigencia de los ensayos tradicionales de asfaltos viales, de Marcelo J. Alvarez*:

- **Penetración**. El ensayo de penetración es uno de los ensayos más antiguos realizados en asfaltos, fue presentado por A.W. Dow en el documento "The Testing of Bitumens for Paving Purposes,", en la sexta reunión anual de ASTM en 1903⁶, a partir de una modificación al penetrómetro inventado en 1888 por C. Bowen, de la compañía Barber Asphalt Paving. La penetración es una medida de la consistencia del asfalto, la cual consiste básicamente en la medición de la penetración de una aguja estándar en una muestra de asfalto a 25°C, bajo la aplicación de una carga de 100 gramos en un periodo de 5 segundos. El ensayo se realiza con base en la norma ASTM D 5 Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials.
- Punto de Inflamación. El punto de inflamación consiste en la combustión instantánea de las fracciones de volátiles que se están separando del asfalto. El ensayo se realiza para determinar la temperatura máxima a la cual puede manejarse y almacenarse el asfalto, sin peligro de que se inflame. El ensayo se realiza con base en la norma ASTM D 92 Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester
- **Ductilidad**. La ductilidad es una medida de cuanto puede elongarse una muestra de asfalto antes de que se rompa en dos. El ensayo se realiza con base en la norma ASTM D 113 Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials.
- **Solubilidad**. El ensayo de solubilidad es un procedimiento para medir la pureza de un cemento asfáltico. El ensayo se realiza con base en la norma ASTM D 2042 Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene.
- Viscosidad Absoluta. El ensayo se realiza a una temperatura de 60°C, representa la viscosidad del cemento asfáltico a la temperatura más alta que el pavimento puede experimentar durante su etapa de servicio. El ensayo se realiza con base en la norma ASTM D 2171 Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer.

.

⁶ History of ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials, 1903-2003

- Viscosidad Cinemática. El ensayo se realiza a una temperatura de 135°C, la cual corresponde aproximadamente a la viscosidad del asfalto durante el mezclado y colocación de la mezcla asfaltica en caliente. El ensayo se realiza con base en la norma ASTM D 2170 Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts (Bitumens).
- Película Delgada en Horno. Es un procedimiento mediante el cual se expone una muestra de asfalto a condiciones que se aproximan a las ocurridas durante las operaciones de producción de mezcla asfáltica en caliente. En las muestras que se han expuesto a dicho procedimiento, se pueden realizar ensayos de penetración y viscosidad, para medir el endurecimiento o envejecimiento que ha experimentado el asfalto. El ensayo se realiza con base en la norma ASTM D 1754 Standard Test Method for Effect of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin-Film Oven Test).
- RTFO. El ensayo simula el envejecimiento del asfalto durante la producción de la mezcla asfáltica y la colocación de la misma, este fue desarrollado en el Departamento de Transporte de California. Las muestras de asfalto son expuestas a calor y aire, aproximándose a la exposición del asfalto durante el mezclado y colocación de la mezcla. El ensayo se realiza con base en la norma ASTM D 2872 Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).
- Punto de reblandecimiento. El ensayo se realiza con base en la norma ASTM D 36 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), en la cual se indica que el punto de reblandecimiento es un índice de la tendencia del material a fluir a elevadas temperaturas a experimentar en servicio. Al respecto, es importante considerar que dicho comportamiento no necesariamente corresponderá al que pueda experimentar la mezcla asfáltica que constituye la capa de rodadura del pavimento, debido a la interacción asfalto-agregados y por el endurecimiento que experimenta el cementante, durante el proceso de producción de la mezcla asfáltica y en su etapa de servicio.

2.3.1 Sistema de Clasificación por Penetración.

El método de penetración fue el primer sistema desarrollado para la clasificación de asfaltos y todavía es utilizado por algunas agencias de carreteras en la región. Dicho sistema fue desarrollado en 1918 por el Bureau of Public Works (ahora Federal Highway Administration, FHWH)⁷, 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 pavimentación⁸, la cual sufrió un cambio significativo en 1968, al reducir el número de tipos de cemento asfáltico de 10 a 5.

Según la ASTM, la clasificación del cemento asfáltico por penetración conlleva el desarrollo de una serie de ensayos de laboratorio, los cuales están contemplados en la ASTM D946/D946M-09a, Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction. Cabe señalar que según AASHTO, la especificación para clasificar cementos

_

⁷ The Handbook of Highway Engineering, T.F. Fwa

⁸ History of ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials, 1903-2003 de Prithvi S. Kandhal

asfálticos por penetración ha sido la **AASHTO M 20 Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement**; sin embargo, dicha especificación ha sido descontinuada a partir de la edición 2004.

A continuación, en las tablas 2.3 y 2.4, se presentan las características físicas que deben cumplir los cementos asfálticos, para ser clasificados de acuerdo a la especificación ASTM D946/D946M – 09a.

	Norma		Clasi	ficación	por Pe	netració	ón (Gra	dos de l	Penetra	ación)	
Ensayo	de ensavo	40 - 50		60 - 70		85 - 100		120-150		200-	-300
	ASTM	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	230		230		230		220		175	
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 Requerimientos para cementos asfálticos para uso en construcción de pavimentos. Fuente: Adaptado de Tabla 1 de ASTM D946/D946M – 09a

	Norma		Clasi	ficación	por Pe	netracio	ón (Gra	dos de l	Penetra	ación)		
Ensayo	de ensayo		40 -	50	60 -	70	85 -	100	120-	150	200-	-300
	ASTM	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	
Punto de ablandamiento (°C)	D 36	49		46		42		38		32		
Flash Point (°C)	D 92	230		230		230		220		175		
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 2.4 Requerimientos para cementos asfálticos clasificados por penetración. Fuente: Adaptado de Tabla 2 de ASTM D946/D946M – 09a

Cabe señalar que de acuerdo a la especificación ASTM D946/D946M-09a, los requerimientos indicados en la tabla 2 de dicha especificación (ver tabla 2.4 de este documento), limita la susceptibilidad a la temperatura de los asfaltos respecto a los requerimientos indicados en la tabla 1 (ver tabla 2.3 de este documento), indicándose además que los asfaltos que satisfacen los requerimientos de la tabla 2, también cumplirán los requerimientos de la tabla 1, para el mismo grado de cemento asfáltico.

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 a continuación en la figura 2.3, se visualiza con mayor facilidad este comportamiento.

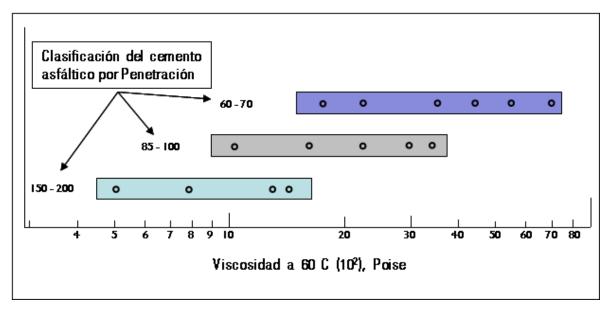


Figura 2.3. Resultados de ensayos de viscosidad a 60°C, realizados en asfáltos clasificados por penetración. Cada punto al interior de los recuadros constituye un suministrante de asfalto. Fuente: Adaptado de Asphalt Cement Consistency Study, Fiel Evaluation of Viscosity- and Penetration-Graded Asphalt Cements, Final Report, Louisiana.

2.3.2 Sistema de Clasificación por Viscosidad.

El sistema de clasificación por viscosidad fue introducido a principios de la década de 1960⁹, 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

⁹ The Future of California's Asphalt Binder Specifications, http://www.graniterock.com/

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 requisitos para clasificar un cemento asfáltico por viscosidad, están contemplados en la especificación ASTM D3381/D3381-09a, Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction y en AASHTO M226-80 (2008), Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement.

A continuación, se presentan las características físicas que deben cumplir los cementos asfálticos, para ser clasificados de acuerdo a la especificación ASTM D3381/D3381-09a. Se considera importante indicar que 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 las tablas 2.5 y 2.6 se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos:

	Norma	(Clasific	ación	en Resi	iduo A	sfáltico	(Grad	os basa	dos en	asfalto	origina	al)
Ensayo	de ensayo	AC	-2.5	A	AC-5		AC-10		AC-20		AC-30		C-40
	ASTM	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Viscosidad Absoluta (Pa.s)	D 2171	20	30	40	60	80	120	160	240	240	360	320	480
Viscosidad Cinemática (mm²/s)	D 2170	80		110		150		210		250		300	
Penetración (0.1 mm)	D 5	200		120		70		40		30		20	
Flash Point (°C)	D 92	165		175		220		230		230		230	
Solubilidad (%)	D 2042	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	
Е	Ensayos en residuo de asfalto, después de ensayo de Película Delgada, ASTM D 1754												
Viscosidad Absoluta (Pa.s)	D 2171		125		250		500		1,000		1,500		2,000
Ductilidad (cm)	D 113	100		100		50		20		15		10	

Tabla 2.5: Requisitos para cementos asfálticos clasificados por Viscosidad a 60°C Fuente: Adaptado de Tabla 1 de especificación ASTM D 3381/D3381-09a.

	Norma	(Clasific	ación	en Resi	iduo A	sfáltico	(Grad	os basa	dos en	asfalto	origina	nl)
Ensayo	de ensayo	AC	-2.5	A	C-5	A	C-10	A(C-20	A	C-30	AC	C-40
	ASTM	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Viscosidad Absoluta (Pa.s)	D 2171	20	30	40	60	80	120	160	240	240	360	320	480
Viscosidad Cinemática (mm²/s)	D 2170	125		175		250		300		350		400	1
Penetración (0.1 mm)	D 5	220		140		80		60		50		40	
Flash Point (°C)	D 92	165		175		220		230		230		230	
Solubilidad (%)	D 2042	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0		99.0	
E	Ensayos en residuo de asfalto, después de ensayo de Película Delgada, ASTM D 1754												
Viscosidad Absoluta (Pa.s)	D 2171		125		250		500		1,000		1,500		2,000
Ductilidad (cm)	D 113	100		100		75		50		40		25	

Tabla 2.6: Requisitos para cementos asfálticos clasificados por Viscosidad a 60°C Fuente: Adaptado de Tabla 2 de especificación ASTM D 3381/D3381-09a.

Cabe señalar que en la nota 2 de la especificación ASTM D3381/D3381-09a, se indica que en la Tabla 2 de esa especificación (ver tabla 2.6 de este documento), se especifica cementos asfálticos que son menos susceptibles a la temperatura respecto a los especificados en la Tabla 1 (ver tabla 2.5 de este documento), indicándose además que los asfaltos que satisfacen los requerimientos de la Tabla 2, también cumplirán los requerimientos de la Tabla 1, para el mismo grado de cemento asfáltico.

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 se presentan las características físicas que deben cumplir estos asfaltos:

	Norma de	Cla	Clasificación en Residuo Asfáltico (Grados basados en residuo asfáltico)										
Ensayo	ensayo	AR - 1000		AR - 2000		AR – 4000		AR - 8000		AR – 16000			
	ASTM	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx		
Viscosidad Absoluta (Pa.s)	D 2171	75	125	150	250	300	500	600	1,000	1,200	2,000		
Viscosidad Cinemática (mm²/s)	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 (cm)	D 113	100		100		75		75		75			
Ensayos realizados en asfalto original													
Flash Point (°C)	D 92	205		220		225		230		240			
Solubilidad (%)	D 2042	99.0		99.0		99.0		99.0		99.0			

Tabla 2.7: Requisitos para cementos asfálticos clasificados por Viscosidad a 60°C Fuente: Adaptado de Tabla 3 de especificación ASTM D3381/D3381-09a.

A continuación, en la Figura 2.4, 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 2.4, 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.

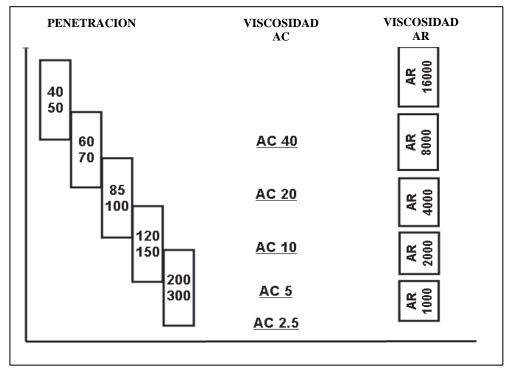


Figura 2.4. Comparación de sistemas de clasificación por Penetración y Viscosidad. Fuente: Adaptado del documento PERFORMANCE GRADED (PG) ASPHALTS IN CALIFORNIA del Institute of Transportation Studies de la University of California Berkeley

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 siguiente Figura.

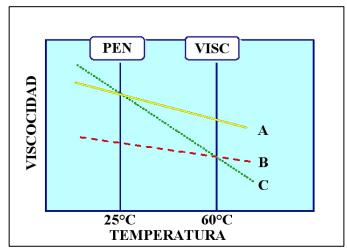


Figura 2.5. Comparación de sistemas de clasificación de asfaltos Fuente: Adaptado de Superpave Binder Specification Workshop, Federal Highway Administration.

2.3.3 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 servicio¹⁰. Los ensayos requeridos para la clasificación del asfalto, están contemplados en la **especificación ASTM D6373-07, Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder y AASHTO M320, 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, y 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 2.8, se presentan las características físicas que deben cumplir los cementos asfálticos, para ser clasificados de acuerdo a la norma ASTM D6373-07.

Es importante aclarar que en la selección del tipo de cemento asfáltico para producir la mezcla asfáltica, también deberá considerarse el volumen de tráfico y las velocidades de operación que se ha considerado en la vía, lo cual será abordado con mayor detalle en este documento en el numeral 3.1 Método de Superpave.

-

¹⁰ Superpave Fundamentals, NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE

		P	G 58				PG 64	ı				PG 7	0		PG 76				
Grado de desempeño	-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
						ASFA	LTO OI	RIGINA	L										
Punto de inflamación, mín °C										230									
Viscosidad utilizando viscosímetro rotacional, máx °C										135									
Reómetro de corte dinámico G°/senδ, min 1.00 kPa @ 10 rad/seg Temperatura de ensayo °C			58				64					70					76		
	RESIDUO DEL ENSAYO ROLLING THIN FILM OVEN																		
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				
				R	ESIDU	O PRE	SSURF	E AGIN	G VESS	EL									
Temp. de envejecimiento PAV, °C			00				100					100					100		
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
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 2.8. Requisitos para clasificar el asfalto por desempeño. Fuente: Adaptado de Tabla 1 de ASTM D 6373-07, Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder

3.0 METODOLOGIAS UTILIZADAS PARA LA SELECCIÓN DE CEMENTOS ASFALTICOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE.

En general, la selección del tipo de cemento asfáltico para producir una mezcla asfáltica en caliente, que será utilizada en la construcción de la capa de rodadura de una estructura de pavimento, debe considerar principalmente las condiciones climatológicas y las solicitaciones de carga debido al flujo vehicular, a las que se verá sometido el pavimento durante su etapa de servicio. Lo anterior, con el objeto de alcanzar un adecuado desempeño de la estructura de pavimento, minimizando la ocurrencia de deficiencias prematuras tales como ahuellamiento, agrietamientos entre otros.

Al respecto, la Guía para el Diseño de Estructura de Pavimento 1993 de la American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO), indica en el numeral 1.7 ENVIROMENT, página I 22, que existen dos principales factores ambientales que deben ser considerados para el desempeño y diseño estructural del pavimento, correspondientes a la temperatura y la lluvia. Asimismo en dicha Guía, en la página I 27 del numeral 1.7, se hace referencia a que en las recomendaciones del documento "Minimizing Premature Cracking in Asphaltic Concrete Pavement," NCHRP Report 195, 1978, se indica que los asfaltos de grado suave, por ejemplo AC-5 o equivalente debería ser utilizado en climas fríos (cuando la temperatura promedio anual del aire es menor que 45°F (7.2°C)) y que grados mas duros, por ejemplo AC-20 o equivalente, en climas calientes (cuando la temperatura promedio anual del aire es mayor que 75°F (23.9°C)). Se indica además que la selección específica del grado de asfalto deberá estar en función de la experiencia local; sin embargo, se recomienda tener en consideración los aspectos antes citados.

En este mismo orden, existen diferentes metodologías recomendadas internacionalmente para la selección del tipo de cemento asfáltico para la producción de mezclas asfálticas en caliente, considerando las condiciones climáticas que se generan en la zona de emplazamiento final de la mezcla asfáltica. En esta investigación, se hará referencia a las siguientes metodologías:

- 1. Método de SUPERPAVE
- 2. Método del Instituto del asfalto
- 3. Método del Departamento de Defensa de Los Estados Unidos de América

A continuación se presentan los aspectos que se considera más relevantes sobre cada una de las metodologías antes indicadas.

3.1 Método de SUPERPAVE.

Los cementos asfálticos por desempeño, son seleccionados basados en el clima en el cual el pavimento estará en servicio, especificándose la temperatura mínima y máxima en la que el asfalto presente un adecuado desempeño. El sistema Superpave ¹¹ dispone de tres (3) metodologías a través de las cuales se puede seleccionar el grado de asfalto, las cuales corresponden a:

¹¹ SUPERPAVE MIX DESING, Asphal Institute, Superpave Series No.2 (SP-2)

- Area Geográfica. La Agencia de Carreteras desarrolla un mapa, donde se muestre los grados de asfalto a ser usado por el Diseñador, con base en las condiciones climáticas o políticas establecidas.
- **Temperatura del Pavimento**. El Diseñador determina la temperatura de diseño del pavimento.
- **Temperatura del aire**. El Diseñador determina la temperatura del aire, las cuales son convertidas a temperatura de diseño del pavimento.

La selección del grado de cemento asfáltico, a partir de la temperatura del aire, es obtenido de la base de datos de estaciones meteorológicas, 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 disponibles. De acuerdo a los investigadores del programa SHRP, seleccionaron el valor promedio de estos siete días como un método óptimo para caracterizar la condición de diseño para altas temperaturas. En el caso de zonas donde se generan temperaturas muy bajas, se recomienda utilizar la temperatura del aire del día mas frío.

Es importante considerar que la temperatura que será utilizada en la selección del grado de cemento 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 objeto de determinar la temperatura del pavimento de manera indirecta, desarrollaron 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 de diseño del pavimento, es la siguiente:

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

Donde:

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

Tair = Temperatura promedio máxima del aire correspondiente al periodo de siete días continuos mas calientes (°C)

Lat = Latitud geográfica del provecto en grados.

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

$$T_{min} = (0.859)*(Tair) + (1.7),$$

Donde:

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

Tair = Temperatura mínima del aire en año promedio (°C)

Cabe señalar que en el proceso de selección del grado de cemento a utilizar, el Diseñador deberá considerar adicionalmente cierto grado de confiabilidad, relacionado con la probabilidad de que las temperaturas que ocurran en la zona no superen las temperaturas máximas y mínimas de diseño.

Asimismo, el diseñador deberá tener en cuenta que la selección del grado de asfalto con base en los datos de clima, considera que la capa de rodadura donde estará incorporado el asfalto, estará sometida a cargas rápidas (velocidad: 90 km/h) y para un tráfico de aproximadamente 30 millones de ESAL's, estimados para un periodo de 20 años. Por lo anterior, en vías que estarán sometidas a tráfico lento o estacionario y/o mayores niveles de carga vehicular, respecto a los establecidos en el modelo, debe realizarse un incremento de uno o dos grados en el asfalto seleccionado con los criterios de clima, tal como se resume en la Tabla 3.1.

Volumen de Tráfico	Condición de Velocidad del Vehículo								
ESAL's (Millones)	Estacionaria	Baja	Estándar						
< 0.3									
0.3 - 3	2	1							
3 – 10	2	1							
10 – 30	2	1							
> 30	2	1	1						

Tabla 3.1 Ajuste del grado de cemento asfáltico (PG) con base en volumen y velocidad de tráfico. Fuente: Adaptado Superpave Fundamentals Reference Manual, National Highway Institute

Cabe señalar que lo anterior debe aplicarse en zonas donde se generan temperaturas altas, ya que dichas variables no son influyentes a bajas temperaturas. Si se desea mayor información sobre estos aspectos, puede referirse al documento SUPERPAVE MIX DESING, Asphal Institute, Superpave Series No.2 (SP-2).

3.2 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 registrada en la zona donde se desarrollará el proyecto.

A continuación en la Tabla 3.2, 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 3.2 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)

3.3 Método del DEPARTAMENTO DE DEFENSA DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA.

La metodología a la que se hace referencia en este apartado, se presenta de manera detallada en el documento **ESTANDARD PRACTICE MANUAL FOR FLEXIBLE PAVEMENTS del Departamento de Defensa** de los Estados Unidos de América. La metodología se basa fundamentalmente en el análisis estadístico de los registros históricos de temperaturas ocurridas en una región y su correlación con las propiedades físicas de los cementos asfálticos, a partir de lo cual se selecciona el tipo de cemento asfáltico más apropiado para la producción de mezclas asfálticas en caliente.

En el método se consideran las temperaturas promedio máximas mensuales de una región, para determinar un parámetro identificado como **Índice de Temperatura del Pavimento (Pavement Temperature Index, PTI)**. Si en una región se han registrado temperaturas promedio máximas mensuales por encima de 23.9°C (75°F), el valor de PTI se determina como la suma de los excedentes de 23.9°C. En regiones donde las temperaturas promedio mensuales no exceden 23.9°C, el valor de PTI se determina como la diferencia entre la temperatura promedio máxima más alta para el mes más cálido y 23.9°C. A partir de los resultados de PTI, se establecen criterios para clasificar la región y el tipo de cemento asfáltico correspondiente, lo cual se presenta a continuación en la Tabla 3.3.

Índice de Temperatura del Pavimento acumulado	Clasificación de la Región	Criterios de selección del cemento asfáltico
Menores que 16.7°C (30°F)	Fría	Utilizar Método Penetración- Viscosidad para regiones frías
De 16.7°C a 44.4°C (30°F a 80°F)	Calida	Utilizar asfalto que posea penetración 85 - 100 (ensayo realizado en asfalto original)
Mayores que 44.4°C (80°F)	Caliente	Utilizar asfalto que posee una penetración 60 – 70 (ensayo realizado en asfalto original)

Tabla 3.3 Criterio de selección del cemento asfáltico basado en el Índice de Temperatura del Pavimento Fuente: Adaptado de Table 2-3 Asphalt Cement Selection Criteria Based on Pavement Index, *Standard Practice Manual for Flexible Pavement*.

En la tabla 3.3, se observa que la selección del cemento asfáltico para zonas clasificadas como Cálida y Caliente, se realiza directamente a partir del valor acumulado del Indice de Temperatura del Pavimento y para las zonas clasificadas como Fría, debe implementarse adicionalmente el método identificado como Penetración-Viscosidad.

En vista de que en nuestro país no existen zonas donde se registren temperaturas tan bajas como para clasificar una región como fría, la metodología Penetración-Viscosidad no será utilizada en la presente investigación. No obstante lo anterior, a continuación se presenta de manera general los aspectos relacionados sobre dicha metodología, si se desea mayor información sobre la misma puede consultarse el documento *Standard Practice Manual for Flexible Pavement*.

Método de Penetración - Viscosidad

El método de Penetración-Viscosidad es utilizado para determinar el tipo de cemento asfáltico en regiones frías (clasificado a partir del Indice de Temperatura del Pavimento), el cual requiere de información climatológica adicional, a partir de lo cual se estima el Índice de Congelamiento de Diseño ¹² (Design Freezing Index, DFI) y el número de Penetración–Viscosidad (Penetration-Viscosity Number,PVN).

El Índice de Congelamiento de Diseño 13 (Design Freezing Index, DFI), es utilizado para diferenciar entre climas en zonas frías, dicho valor se determina a partir del promedio de los valores del Índice de Congelamiento de los tres inviernos más fríos en los últimos 30 años de registro; si no se cuenta con información de los 30 años de registro, puede utilizarse el Índice de Congelamiento del invierno más frío en los últimos 10 años. El número de Penetración–Viscosidad (PVN), también identificado como Número Pen–Vis, es utilizado para cuantificar la susceptibilidad a la temperatura de un cemento asfáltico y estimar su capacidad para resistir agrietamientos por bajas temperaturas, es determinado a partir del valor de penetración a 25°C y la viscosidad cinemática a 135°C. A partir de dichos parámetros se determina el cemento asfáltico más apropiado para dicha región.

¹³ Pavement Design for Seasonal Frost Conditions, AIR FORCE AFM 88-6, Chap.4

¹² Pavement Design for Seasonal Frost Conditions, AIR FORCE AFM 88-6, Chap.4

4.0 SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO ASFALTICO PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE EN EL SALVADOR.

La selección del tipo de cemento asfáltico para producir mezclas asfálticas en caliente en el país, objeto de la presente investigación, se ha realizado considerando principalmente las metodologías del Instituto del Asfalto y del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, a las cuales se hizo referencia en el numeral 3.0 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, correspondiente a zonas representativas del país. También se ha considerado en la presente investigación, los resultados de ensayos de laboratorio realizados en muestras de cementos asfálticos comúnmente utilizados en el país para la producción de mezcla asfáltica en caliente, llevados a cabo en el Laboratorio de la Unidad de Investigación y Desarrollo Vial. A continuación se presenta aspectos generales sobre los trabajos realizados y un resumen de los resultados obtenidos.

4.1 Análisis de registros históricos de temperatura del aire.

La Unidad de Investigación y Desarrollo Vial, solicitó al Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), la información correspondiente a temperaturas máximas y mínimas del aire, que han ocurrido en el país en el periodo comprendido entre los años 1983 y 2002. La selección de las estaciones meteorológicas, de las cuales se suministró los registros de temperatura del aire, se realizó considerando principalmente los siguientes criterios: a) Ubicación geográfica, b) Temperatura promedio de la zona y c) Disponibilidad de registros de temperaturas para el período de análisis. A continuación en la Tabla 4.1, se detallan las estaciones meteorológicas seleccionadas, y en la Figura 4.1, se indica esquemáticamente la ubicación 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	Perquín	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 4.1. Ubicación de estaciones meteorológicas consideradas en la investigación. Fuente: Adaptado de información proporcionada por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.



Figura 4.1 Esquema de ubicación de estaciones meteorológicas que han registrado la información de temperatura utilizada en la investigación.

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 se presenta de forma gráfica los registros de temperatura para cada una de las estaciones meteorológicas antes señaladas.

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, correspondiente al periodo de análisis de 1970 a 2003, contenida en mapas elaborados por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), los cuales se encuentran disponibles en el sitio web de esa Institución (www.snet.gob.sv). Con base en la información 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 indicadas en la Tabla 4.1.

A continuación, en la Tabla 4.2, 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 14; en anexo se presenta gráficamente los valores de temperatura máxima y mínima para el período 1983 – 2002.

¹⁴ Con base en información contenida en los Boletines Climáticos Anuales del SNET, correspondientes a los años 2007, 2008 y 2009, los valores extremos de temperatura indicados en la Tabla 4.2 no han sido superados.

No.	Estación Meteorológica	promed	emperatura io máxima nsual	tempe promedi	enor eratura o mínima nsual	Índic Tempera Pavimen	tura del	Rango de temperatura media anual	
		°C	Año	°C	Año	Máximo	Año	(°C)	
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	Perquín	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 4.2 Valores extremos de temperatura promedio máxima, mínima y mensual registradas en el país. Fuente: Elaborado con base en registros de temperatura del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Con base en el análisis de los registros históricos de la temperatura del aire (máximas, mínimas y media anual) ocurrida en el país y en las metodologías 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 4.3 se presenta un resumen de los tipos de cemento asfáltico recomendados:

			TIPO DE CEMENTO ASFALTICO RECOMENDADO							
No.	Estación Meteorológica	Ubicación de Estación Meteorológica	Método del Depa Defensa de los Es		Método del Instituto del Asfalto					
		(Departamento)	Clasificación de Región	Tipo de Asfalto	Clasificación de Región	Tipo de Asfalto				
1	La Unión	La Unión				• AC-20				
2	Acajutla	Sonsonate								
3	Puente Cuscatlán	San Vicente		DEN (0/50	Caliente	AC-30PEN 60/70				
4	El Papalón	San Miguel	Caliente	PEN 60/70		• PEN 40/50				
5	Cerrón Grande	Cabañas								
6	San Andrés	La Libertad								
7	El Palmar	Santa Ana				• AC-10				
8	Perquín	Morazán	Cálida	PEN 85/100	Cálida	• AC-20				
9	Las Pilas	Chalatenango	Fría		Cullu	• PEN 85/100				
10	Planes de Montecristo	Santa Ana	Fría			• PEN 60/70				

Tabla 4.3 Tipos de cemento asfáltico recomendados para diferentes zonas del país, con base en metodologías del Departamento de Defensa de los Estados Unidos y del Instituto del Asfalto.

4.2 Registros de temperatura superficial del pavimento.

En general, el desempeño de una capa de rodadura de una estructura de pavimento, dependerá entre otros aspectos de las condiciones ambientales a las que estará expuesta durante su etapa de servicio, en lo que respecta a contenido de humedad, temperaturas máximas y mínimas o el gradiente de temperatura que pueda experimentar la capa de rodadura, entre otros. De manera particular, en lo que respecta a pavimentos flexibles, es importante tomar en cuenta que el cemento asfáltico es un material termoplástico y su comportamiento es incidente en el desempeño de la capa de rodadura asfáltica, por lo 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.

A raíz de lo anterior, dentro del marco de esta investigación se seleccionaron nueve (9) zonas del país, en las cuales personal de la UIDV ha llevado a cabo mediciones directas de la temperatura de la capa de rodadura del pavimento, construida utilizando mezcla asfáltica. La selección de las zonas de medición fue realizada considerando principalmente los siguientes aspectos: a) Ubicación geográfica y b) Registros históricos de temperaturas máximas y mínimas en el país. Cabe señalar que en dichas zonas, también se registró información correspondiente a temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del aire, utilizando estaciones meteorológicas portátiles. Las zonas de medición seleccionadas y la ubicación de las mismas se presentan a continuación en la Tabla 4.4 y en la figura 4.2.

No.	Zona de Medición	Departamento	Identificación de Zona de Medición	Elevación (m.s.n.m.)	Latitud	Longitud
1	Carretera del Litoral, Desvío El Delirio	La Unión	ZM-1	57	13°19'47" N	88°08'55" W
2	Acajutla	Sonsonate	ZM-2	58	13°36'14" N	89°48'17" W
3	Carretera del Litoral, Desvío Zacatecoluca-Comalapa,	La Paz	ZM-3	59	13°28'58" N	89°03'46" W
4	Puente Cuscatlán	San Vicente	ZM-4	94	13°36'34" N	88°33'51" W
5	San Francisco Gotera	Morazán	ZM-5	238	13°41'31" N	88°06'01" W
6	Carretera Troncal del Norte, Desvío Amayo	Chalatenango	ZM-6	292	14°06'15" N	89°09'07" W
7	Metapán	Santa Ana	ZM-7	385	14°20'04" N	89°27'06" W
8	UIDV	San Salvador	ZM-8	662	13°41'21" N	89°14'07" W
9	Cerro Verde	Santa Ana	ZM-9	2009	13°49'34" N	89°37'29" W

Tabla 4.4 Zonas seleccionadas para la medición de temperatura superficial del pavimento.



Figura 4.2 Ubicación de zonas de medición de la temperatura superficial del pavimento.

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 *Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement* de la Federal Highway Administration (FHWA). El procedimiento consiste en realizar una pequeña perforación en la capa de rodadura de mezcla asfáltica, de una profundidad de aproximadamente 2.5 cm, se incorpora un líquido (aceite) en el interior del mismo, se introduce un termómetro y posteriormente, luego de que la temperatura se ha estabilizado, se registra la temperatura (Ver figuras 4.3 y 4.4)

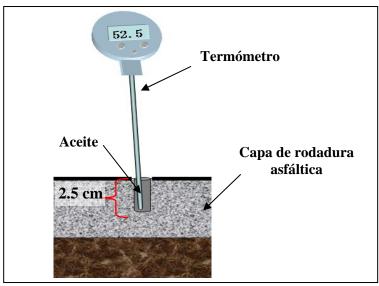


Figura 4.3 Esquema de medición de temperatura de la superficie del pavimento



Figura 4.4. Zona de medición en Carretera del Litoral, Desvío Zacatecoluca-Comalapa. Personal de la UIDV, durante la toma de registro de temperatura superficial del pavimento.

Las mediciones de temperatura superficial del pavimento, se han realizado a la fecha de este documento en cinco periodos, correspondientes a los meses de febrero, abril y agosto de 2009 y enero y marzo de 2010. Cabe indicar que, dentro del marco de la investigación aplicada, se tiene programado realizar mediciones adicionales, para contar con un mayor número de registros. Con base en la información de temperatura ambiente registrada en las zonas de medición antes referidas en la Tabla 4.4, se determinó de manera indirecta la máxima temperatura superficial del pavimento, a partir de las ecuaciones sugeridas por el Sistema SUPERPAVE (ver numeral 3.1 de este documento).

A continuación en la Tabla 4.5, se presenta un resumen de los registros de la máxima temperatura de la superficie del pavimento y la correspondiente temperatura ambiente, registradas en las mediciones directas llevadas a cabo en la capa de rodadura del pavimento, a una profundidad de 2.5 cm aproximadamente; en anexo se presenta gráficamente los registros de temperatura registrada en la superficie del pavimento en cada medición. Asimismo se presenta los valores de temperatura máxima superficial del pavimento, determinada con base en las ecuaciones sugeridas por el Sistema SUPERPAVE (Ver numeral 3.1 Método de Superpave).

		TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO (°C)														
No.	Zona de Medición	1ra medición (Febrero de 2009)			_	2da medición (Abril de 2009)		3ra medición (Agosto de 2009)		4ta medición (Enero de 2010)			5ta medición (Marzo de 2010)			
		TA	TPR	TPC	TA	TPR	TPC	TA	TPR	TPC	TA	TPR	TPC	TA	TPR	TPC
1	Carretera del Litoral, Desvío El Delirio	39.90	64.30	62.45	39.00	65.90	61.59	41.80	66.00	64.26	37.00	57.50	59.68	42.1	68.6	64.6
2	Acajutla	34.20	62.60	57.02	38.50	63.60	61.13	39.40	68.60	61.99	35.50	59.50	58.27	40.6	67.7	63.1
3	Carretera del Litoral, Desvío Zacatecoluca - Comalapa,	37.70	64.10	60.36	39.80	62.60	62.36	43.90	66.30	66.28	34.00	54.30	56.83	41.3	66.4	63.8
4	Puente Cuscatlán	40.20	60.30	62.75	39.50	57.10	62.08	47.20	64.40	69.43	36.20	52.70	58.93	43.4	65.7	65.8
5	San Francisco Gotera	37.70	63.90	60.37	39.50	60.30	62.09	40.20	61.80	62.76	39.50	58.90	62.09	41.3	52.4	63.8
6	Carretera Troncal del Norte, Desvío Amayo	36.40	56.20	59.15	40.30	59.40	62.87	38.70	65.50	61.35	40.30	55.10	62.87	41.1	60.3	63.6
7	Metapán	35.50	60.10	58.30	35.60	59.80	58.40	37.60	51.90	60.31	36.00	54.50	58.78	41.3	58.9	63.8
8	UIDV	31.50	56.30	54.45	35.10	56.90	57.89	34.90	65.40	57.70	33.20	52.40	56.1	34.8	53.2	57.6
9	Cerro Verde	23.50	51.10	46.82	28.40	46.10	51.50	30.70	49.90	53.70	25.50	45.70	48.73	26.2	33.2	49.4

Tabla 4.5 Valores máximos de Temperaturas ambiente y Temperatura de la superficie del pavimento (Registrada en campo y calculada usando ecuaciones del método Superpave), para cada una de las zonas de medición consideradas en la investigación.

Simbología: TA= Temperatura ambiente; TPR= Temperatura del pavimento registrada; TPC=Temperatura del pavimento calculada

4.3 Resultados de ensayos de laboratorio en cementos asfálticos.

Tal como se ha indicado con anterioridad, la **Susceptibilidad a la Temperatura** es una de las propiedades físicas del cemento asfáltico que tiene una incidencia considerable en la producción, colocación y desempeño de las mezclas asfálticas, empleadas en la construcción de capas de rodadura para pavimento. Por consiguiente, es necesario que en la etapa de diseño de la mezcla asfáltica en caliente, se realice una adecuada caracterización del cemento asfáltico, información que servirá de insumo para evaluar el posible comportamiento de la capa de rodadura de mezcla asfáltica, bajo las condiciones de temperatura a las que estará expuesta en la zona de emplazamiento final de la misma. Sin embargo, en el proceso de caracterización o evaluación del cemento asfáltico, es importante tomar en consideración los siguientes aspectos:

- Los cementos asfálticos, se ven expuestos a un proceso de envejecimiento, en las etapas de producción, transporte y colocación de la mezcla asfáltica en caliente. Cabe indicar que los mayores niveles de envejecimiento se generan en la etapa de producción de la mezcla asfáltica.
- Los agregados utilizados en la producción de mezcla asfáltica, generalmente poseen cierto grado de porosidad; a través de la estructura porosa ocurre la absorción de algunos componentes del cemento asfáltico, principalmente correspondientes a las fracciones más ligeras y menos viscosas (absorción selectiva), lo que genera entre otros que la película efectiva de asfalto (asfalto no absorbido) posea un alto contenido de asfaltenos¹⁵, incrementado la dureza de dicha película. Por lo anterior, el cemento asfáltico efectivo tendrá propiedades físicas, químicas y reológicas, diferentes a las propiedades originales de dicho cementante
- El proceso de envejecimiento del cemento asfáltico continúa en la etapa de servicio de la mezcla asfáltica, principalmente por la acción del medio ambiente la (oxígeno, radiación solar, temperatura ambiente, agua, sales, otros), lo que genera entre otros aspectos el incremento en la dureza del cemento asfáltico que constituye la mezcla asfáltica.

Con base en los aspectos antes indicados, la evaluación del desempeño del cemento asfáltico a utilizarse en la mezcla asfáltica en caliente, no debe limitarse a verificar las propiedades en estado virgen; sino que también debe evaluarse las propiedades que pueda presentar el cemento asfáltico después de ser sometido a las condiciones de producción y curado de la mezcla asfáltica en caliente.

A raíz de lo anterior, dentro del marco de la investigación, se llevaron a cabo ensayos de laboratorio en muestras de cementos asfálticos comúnmente utilizados en la producción de mezclas asfálticas en caliente en el país, con el objeto de evaluar la susceptibilidad a la temperatura de los mismos. Al respecto, se determinó entre otros, el valor de **Penetración** del cemento asfáltico, según la norma *ASTM D 5 Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*, y el **Punto de ablandamiento**, según la norma *ASTM D 36 Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*.

.

¹⁵ Absorption of asphalt into porous aggregate, SHRP-A/UIR-90-009, Strategic Highway Research Program

¹⁶ Efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica, Revista Ingeniería e Investigación, Universidad Nacional de Colombia.

Los ensayos se ejecutaron en muestras de cementos asfálticos clasificados por viscosidad como AC-20 y AC-30, de acuerdo a los requerimientos establecidos en la Tabla 2 de la especificación ASTM D 3381/D3381-09a, las cuales se encontraban bajo las siguientes condiciones:

- Muestras de cemento asfáltico en estado virgen.
- Muestras de residuo asfáltico, obtenidas al someter muestras de cemento asfáltico en estado virgen a condiciones de oxidación en laboratorio, a través del ensayo ASTM D 2872 Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).
- Muestras de cemento asfáltico extraídas de mezclas asfálticas producidas en caliente.

A continuación, se presenta un resumen de los resultados de ensayos llevados a cabo.

Tipo de cemento asfáltico	Identificación de la muestra	Condición de la muestra de cemento asfáltico	Penetración	Punto de ablandamiento (°C)
		Asfalto virgen	60.0	51.0
	A	Residuo Asfáltico después de ensayo RTFO	35.0	58.0
		Asfalto extraído de mezcla asfáltica en caliente	32.0	60.2
AC-20		Asfalto virgen	60.0	49.5
	В	Residuo Asfáltico después de ensayo RTFO	35.0	56.0
		Asfalto virgen	65.0	44.7
	C	Residuo Asfáltico después de ensayo RTFO	40.0	58.0
	D	Asfalto virgen	43.0	52.0
		Residuo Asfáltico después de ensayo RTFO	30.0	57.0
		Asfalto extraído de mezcla asfáltica en caliente	30.0	58.0
		Asfalto virgen	42.0	52.0
AC-30	E	Residuo Asfáltico después de ensayo RTFO	35.0	60.1
		Asfalto virgen	53.0	50.0
	F	Residuo Asfáltico después de ensayo RTFO	32.0	59.5
	G	Asfalto virgen	50.0	51.0
		Residuo Asfáltico después de ensayo RTFO	32.0	60.0

Tabla 4.6 Resumen de resultados de ensayos de laboratorio realizados en muestras de cemento asfáltico clasificados como AC-20 y AC-30.

5.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- a) En general el cemento asfáltico a utilizarse en la producción de mezcla asfáltica en caliente, debe seleccionarse en la etapa de diseño de la misma, considerando entre otros aspectos las condiciones medioambientales que se estima ocurrirán en la zona del emplazamiento final de la mezcla asfáltica. Se considera que en la etapa de diseño también puede evaluarse la susceptibilidad térmica del asfalto a través del ensayo de Punto de Ablandamiento, ya que constituye un índice de la temperatura a la cual el cemento asfáltico puede tender a fluir cuando se encuentre en servicio; sin embargo, debe considerarse que este parámetro es solamente un índice y no refleja necesariamente el comportamiento que tendrá la mezcla asfáltica a dichas temperaturas.
- b) En general 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.
- c) En relación con los sistemas de clasificación de cementos asfálticos, se considera que en el país ya no debe utilizarse el Sistema de Clasificación por Penetración, principalmente debido a que proporciona información muy limitada, relacionada con la susceptibilidad térmica que puede presentar el cemento asfáltico. En vista de que en el país no se cuenta con equipos para realizar la clasificación del cemento asfáltico a través del método de Superpave, se recomienda continuar utilizando el Sistema de Clasificación por Viscosidad. Lo anterior, no obstante que este sistema también presenta limitantes; sin embargo, brinda información adicional sobre el comportamiento del cementante a las temperaturas de producción de la mezcla asfáltica y a las temperaturas que se generan normalmente en la etapa de servicio.
- d) Se considera que la ecuación propuesta por el sistema Superpave, para determinar la temperatura máxima del pavimento, puede utilizarse en el país como una primera aproximación para seleccionar la temperatura de diseño del pavimento. Sin embargo, debe de prevalecer la experiencia local.
- e) Con base en los resultados obtenidos en esta investigación y en la experiencia local, se considera que desde el punto de vista técnico el tipo de cemento asfáltico que debe utilizarse en el país, corresponde a un cemento asfáltico clasificado por viscosidad como AC-30 de acuerdo a los requerimientos indicados en la ASTM D3381/D3381-09a, Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction. Lo anterior, debido a que este tipo de cemento asfáltico puede tener un mejor desempeño bajo las condiciones climáticas de nuestro país, principalmente en las zonas ubicadas a elevaciones menores a 500 m.s.n.m., localizadas principalmente en la zona costera y en el oriente del país.

No obstante lo anterior, se recomienda que en proyectos de carreteras donde se tenga previsto que la estructura del pavimento estará sometida a solicitaciones de carga importantes (respecto a la cantidad y/o por las cargas que transporten los vehículos) o se localicen en zonas donde se registran temperaturas altas, se recomienda realizar un diseño integral de la

mezcla asfáltica, para garantizar un buen desempeño de la estructura de pavimento bajo las solicitaciones a las que estará expuesta durante su vida útil.

6.0 REFERENCIAS

- 1. Asphalt Mixture Design and Analysis, Asphalt Institute, Background of SUPERPAVE.
- 2. AASHTO M 320-03, Performance Graded Asphalt Binder, American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing.
- 3. AASHTO MP1, Performance Graded Asphalt Binders, American Association of State Highway and Transportation Officials, Standard, Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing.
- 4. ASTM D 8 Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements.
- 5. ASTM D946/D946M-09a, Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction.
- 6. ASTM D3381/D3381-09a, Standard Specification for Viscosity-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement Construction.
- 7. ASTM D6373-07, Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder.
- 8. Absorption of asphalt into porous aggregate, SHRP-A/UIR-90-009, Strategic Highway Research Program SHRP, Asphalt Research Program Technical Memorandum # 4
- 9. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, Asphalt Institute.
- 10. Superpave Fundamentals Reference Manual, National Highway Institute
- 11. History of ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials, 1903-2003
- 12. The Handbook of Highway Engineering, T.F. Fwa
- 13. The Future of California's Asphalt Binder Specifications, http://www.graniterock.com/
- 14. SUPERPAVE MIX DESING, Asphal Institute, Superpave Series No.2 (SP-2)
- 15. Pavement Design for Seasonal Frost Conditions, AIR FORCE AFM 88-6, Chap.4
- 16. Efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica, Revista Ingeniería e Investigación, Universidad Nacional de Colombia.

ANEXO

- A. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales. Período enero/1983 diciembre/2002.
- B. Registros de Temperatura del pavimento en Zonas de Medición.
- C. Mapa de elevaciones de El Salvador con clasificación de regiones de acuerdo al Método del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América y del Instituto del Asfalto.

ANEXO A

Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales.

Período enero/1983 – diciembre/2002.

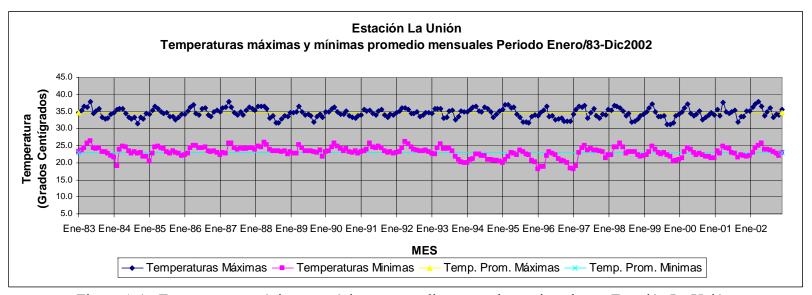


Figura A.1. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación La Unión.

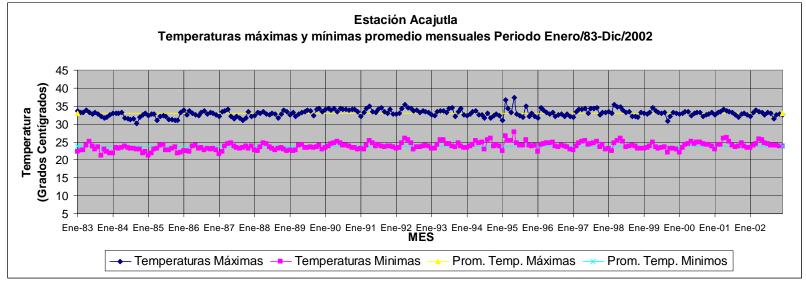


Figura A.2. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Acajutla.

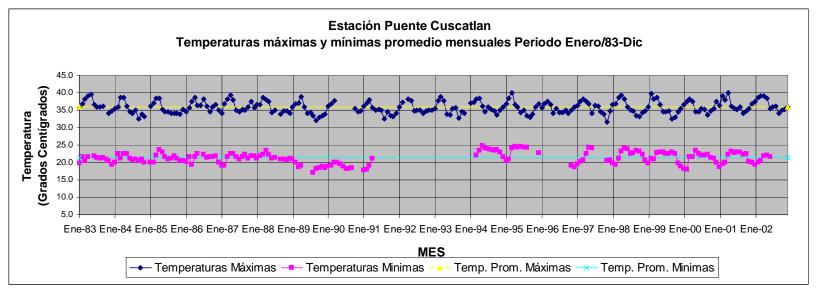


Figura A.3. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Puente Cuscatlán.

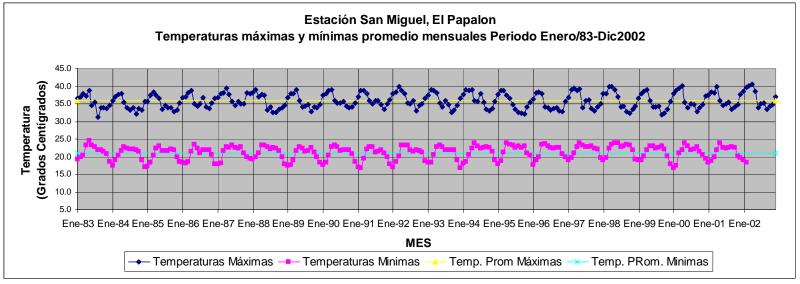


Figura A.4. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación San Miguel, El Papalon...

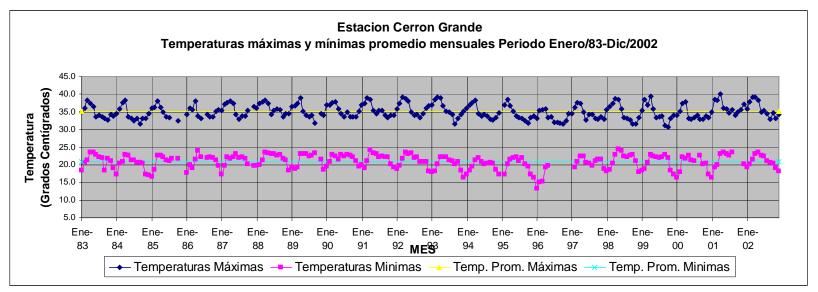


Figura A.5. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Cerrón Grande.

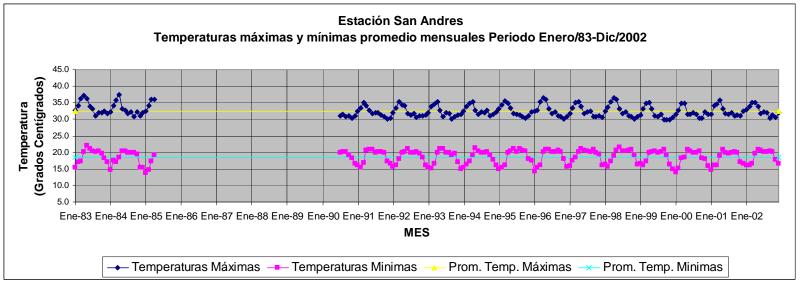


Figura A.6. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación San Andrés.

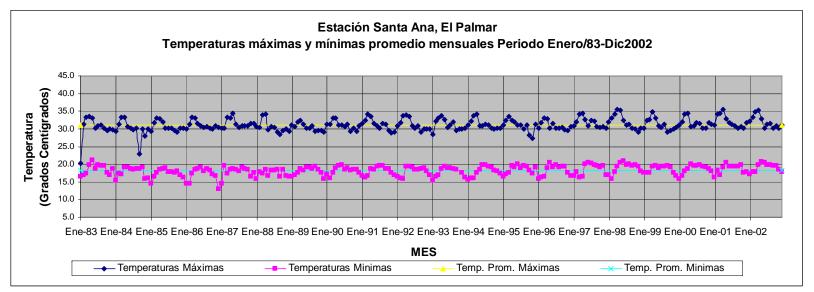


Figura A.7. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Santa Ana, El Palmar...

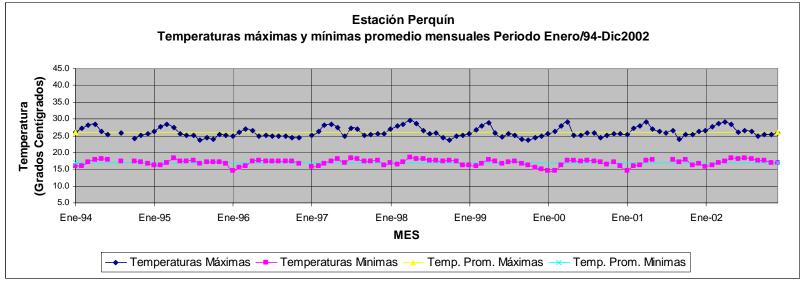


Figura A.8. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Perquin, Morazán.

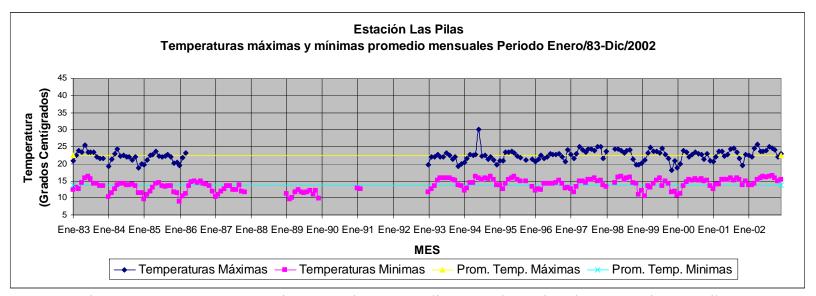


Figura A.9. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Las Pilas.

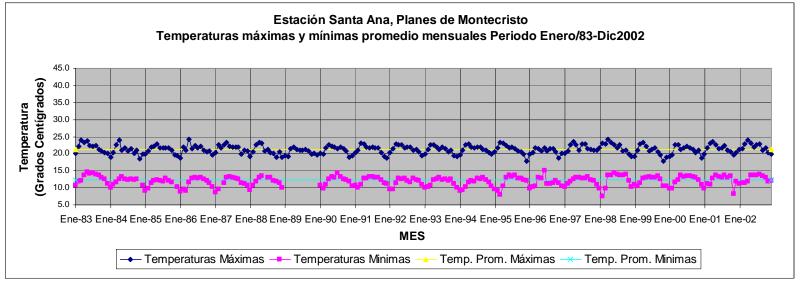


Figura A.10. Temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales registradas en Estación Santa Ana, Planes de Montecristo.

ANEXO B.

Registros de Temperatura del pavimento en Zonas de Medición.

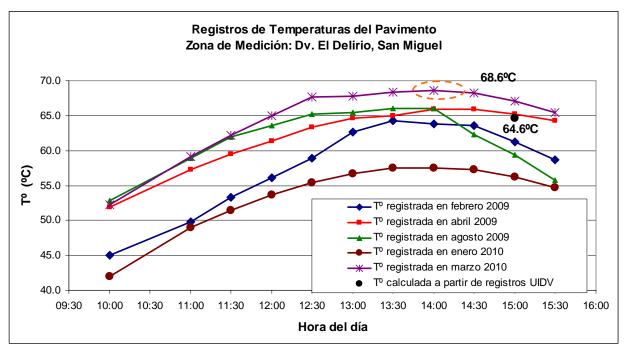


Figura B.1. Registros de Temperaturas del Pavimento. Zona de Medición Dv. El Delirio, San Miguel.

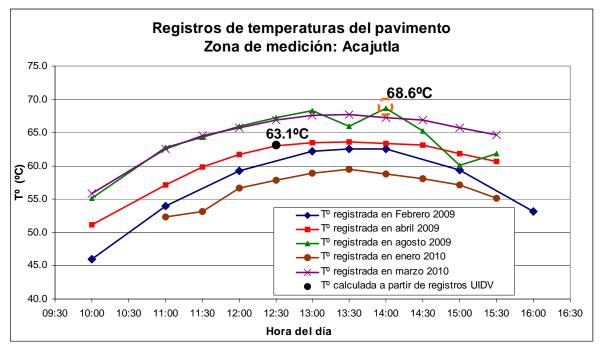


Figura B.2. Registros de Temperaturas del Pavimento. Zona de Medición Acajutla.

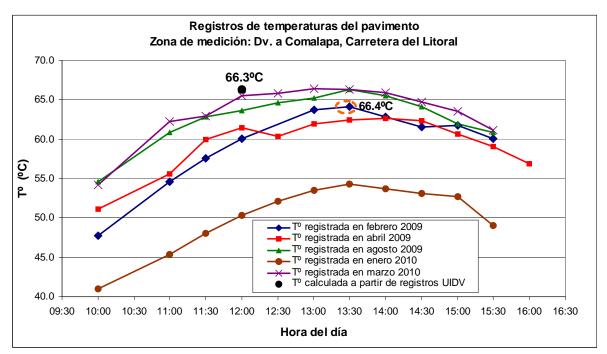


Figura B.3. Registros de Temperaturas del Pavimento. Zona de Medición Dv. a Comalapa, Carretera del Litoral.

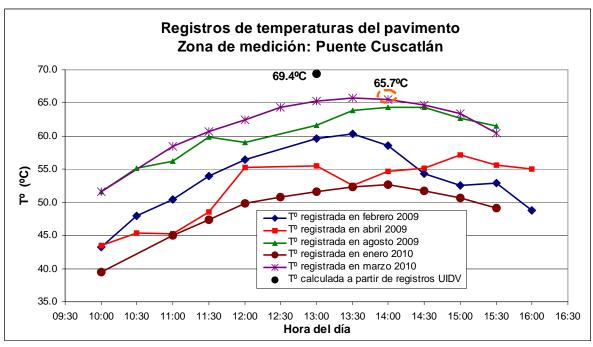


Figura B.4. Registros de Temperaturas del Pavimento. Zona de Medición Puente Cuscatlán.

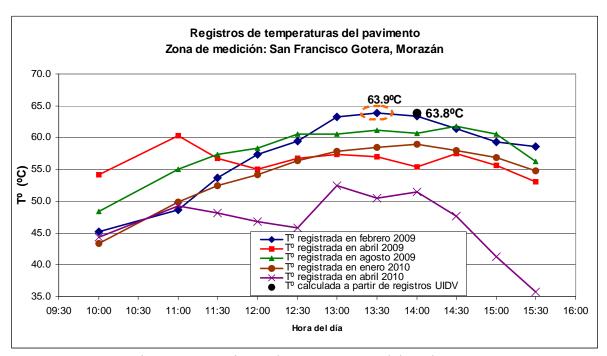


Figura B.5. Registros de Temperaturas del Pavimento. Zona de Medición San Francisco Gotera, Morazán.

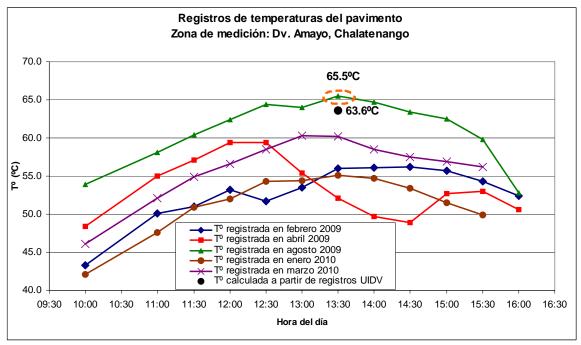


Figura B.6. Registros de Temperaturas del Pavimento. Zona de Medición Dv. Amayo, Chalatenango.

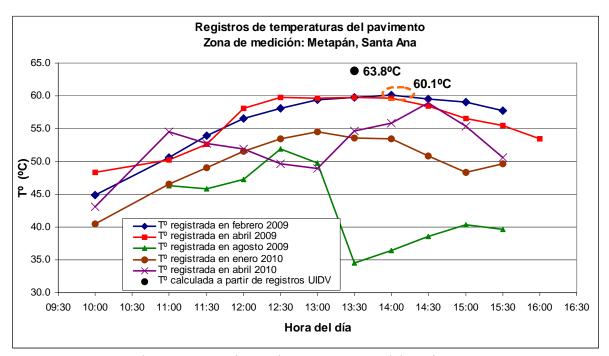


Figura B.7. Registros de Temperaturas del Pavimento. Zona de Medición Metapán, Santa Ana.

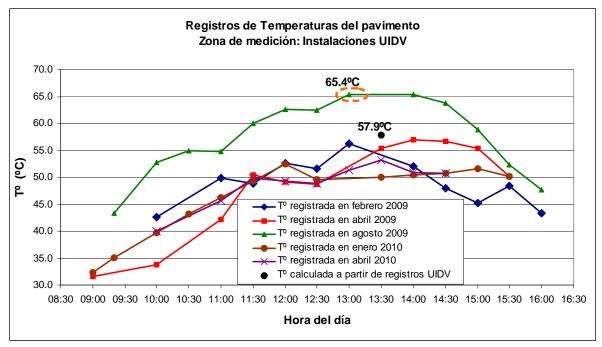


Figura B.8. Registros de Temperaturas del Pavimento. Zona de Medición Instalaciones UIDV.

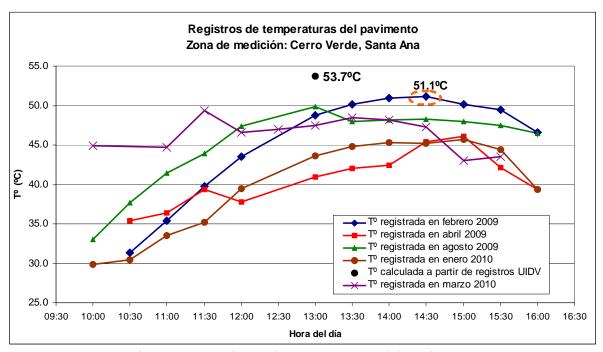


Figura B.9. Registros de Temperaturas del Pavimento. Zona de Medición Cerro Verde, Santa Ana.

ANEXO C.

Mapa de elevaciones de El Salvador con clasificación de regiones de acuerdo al Método del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América y del Instituto del Asfalto.

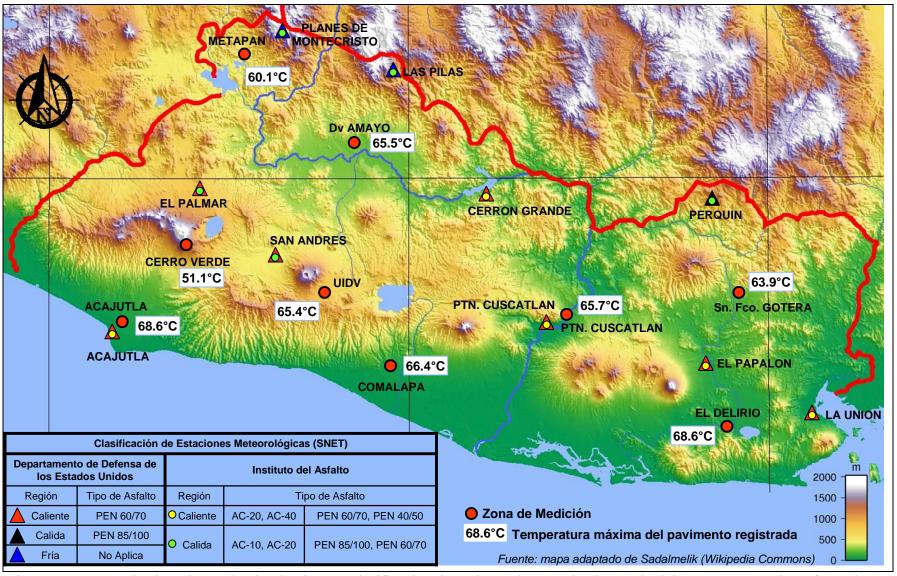


Figura C.1. Mapa de elevaciones de El Salvador con clasificación de regiones de acuerdo al Método del Departamento de Defensa de los Estados Unidos y del Instituto del Asfalto.