



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**“ANÁLISIS DE UN ASFALTO TIPO AC-20 MODIFICADO CON
ELVALOY® POR MEDIO DEL MÉTODO UCL®
(MÉTODO UNIVERSAL DE
CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES)”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:
LUIS ENRIQUE RAMIREZ SOTO**

**ASESOR:
DR. JORGE ALARCÓN IBARRA**

MORELIA, MICHOACÁN, MAYO DE 2008



DEDICATORIAS

A mis Padres:

Dedico especialmente este trabajo a mis padres, Remigio Ramírez Moreno y Margarita Soto Reyes como un homenaje, por el apoyo incondicional y el gran sacrificio que hicieron por llevarme a lograr este gran triunfo que también es de ellos.

A mi Hermano:

A mi hermano Jesús por brindarme su apoyo en todo momento y su cariño.

A mis Abuelos:

A mis abuelos por su apoyo y lo más importante su amor.

A mi Familia:

Gracias a toda mi familia por los consejos y apoyo incondicional que siempre me ofrecieron en todo momento.

A mis Amigos:

A mis Amigos con quienes compartí tristezas y alegrías durante la carrera y han sido como una segunda familia para mí. Y a sus familias por abrirme las puertas de su casa y recibirme con todo cariño.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, que en todo momento me ofreciste sabiduría y fuerza para no dejarme caer en momentos difíciles y así poder lograr este gran triunfo.

A mis padres, sabiendo que jamás existirá una forma de agradecer una vida de lucha, sacrificio y esfuerzo constante.

A la Facultad de Ingeniería Civil por admitirme y dejarme transitar en la academia del conocimiento para mi formación.

A mi asesor. Dr. Jorge Alarcón Ibarra por brindarme su ayuda y conocimiento para realizar el presente trabajo.

A todos mis amigos que siempre me apoyaron de una forma o de otra, pero que siempre estuvieron al pendiente de mi formación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
TABLAS	vii
FIGURAS	viii
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ORIGEN DEL ASFALTO	5
1.2 LOS PRIMEROS USOS DEL ASFALTO	5
1.3 ASFALTOS NATURALES	8
1.3.1 Asfalto	8
1.3.2 Composición del asfalto	14
1.3.3 ASFALTOS derivados de petróleo	15
1.3.4 Obtención de asfaltos en refinerías:	16
1.4 CEMENTOS ASFÁLTICOS	18
1.5 EMULSIONES ASFÁLTICAS	20
1.5.1 Las emulsiones asfálticas pueden ser de los siguientes tipos:	20
1.6 ASFALTOS REBAJADOS	21
1.7 MATERIALES ASFÁLTICOS MODIFICADOS	22
1.7.1 Definición y clasificación	22
1.7.2 Polímero tipo I	22
1.7.3 Polímero tipo II	23
1.7.4 Polímero tipo III	23
1.7.5 Hule molido de neumáticos	23
1.8 REQUISITOS DE CALIDAD	23
1.8.1 Cemento asfáltico modificado	24
1.8.2 Emulsión asfáltica modificada	24
1.9 MEZCLADO DE LOS MODIFICADORES CON EL CEMENTO ASFÁLTICO	24
1.10 CEMENTOS ASFÁLTICOS GRADO PG	27
1.10.1 Grado de desempeño (PG)	27
1.12 PRODUCTOS DE ASFALTO PARA LA CONSTRUCCIÓN	31
CAPÍTULO 2.- MEZCLAS ASFÁLTICAS	32
2.1 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN	32
2.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	33
2.2.1 Mezclas asfálticas de granulometría densa.	33
2.2.2 Mezcla asfáltica de granulometría abierta.	34
2.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRIÓ	34
2.3.1.- Mezcla asfáltica de granulometría densa	34
2.3.2.- Mortero asfáltico	35

2.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL SISTEMA DE RIEGOS.	35
2.5 VENTAJAS EN LAS MEZCLAS EN SERVICIO	35
2.6 DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS PREPARADAS CON POLÍMEROS	37
CAPÍTULO 3.- MÉTODOS TRADICIONALES DE CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS	39
3.1.- MUESTREO DE MATERIALES ASFÁLTICOS.	39
3.1.1.- Muestreo en un solo depósito.	39
3.1.2.- Muestreo en varios depósitos.	42
3.1.3.- Muestreo durante las maniobras de carga y descarga o de aplicación del material asfáltico.	44
3.1.4.- Envase, identificación, transporte y almacenamiento.	45
3.2 VISCOSIDAD DINÁMICA DE CEMENTOS Y RESIDUOS ASFÁLTICOS	46
3.2.1 Objetivo de la prueba	46
3.2.2 Equipo y materiales	47
3.2.3 preparación de la muestra	52
3.2.4 Determinación de la viscosidad dinámica	53
3.2.5 Procedimiento de la prueba	55
3.2.6 Cálculos y resultados	56
3.2.7 Precauciones para evitar errores	57
3.3 VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE CEMENTOS ASFÁLTICOS	57
3.3.2 Objetivo de la prueba	57
3.3.3 Equipo y materiales	58
3.3.4 Preparación de la muestra	60
3.3.5 Determinación de la viscosidad cinemática	60
3.3.6 Cálculos y resultados	62
3.3.7 Precauciones para evitar errores	63
3.4 VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL EN MATERIALES ASFÁLTICOS	64
3.4.1 Objetivo de la prueba	64
3.4.2 Equipo y materiales	64
3.4.3 Preparación de la muestra	67
3.4.4 Procedimiento de la prueba	68
3.4.5 Cálculos y resultados	71
3.4.6 Precauciones para evitar errores	71
3.5 VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD DE CEMENTOS ASFÁLTICOS	72
3.5.1 Objetivo de la prueba	72
3.5.2 Equipo	72
3.5.3 Preparación del equipo	73
3.5.4 Preparación de la muestra	73
3.5.5 Procedimiento de la prueba	73
3.5.6 Cálculos y resultados	74
3.5.7 Precauciones para evitar errores	74
3.6 PENETRACIÓN EN CEMENTOS Y RESIDUOS ASFÁLTICOS	75
3.6.1 Objetivo de la prueba	75
3.6.2 Equipo	75

3.6.3 Preparación de la muestra	78
3.6.4 Procedimiento de la prueba	79
3.6.5 Cálculos y resultados	80
3.6.6 Precauciones para evitar errores	80
3.7 PUNTO DE INFLAMACIÓN CLEVELAND EN CEMENTOS ASFÁLTICOS	81
3.7.1 Objetivo de la prueba	81
3.7.2 Equipo	81
3.7.3 Preparación de la muestra	83
3.7.4 Procedimiento de la prueba	83
3.7.5 Cálculos y resultados	85
3.7.6 Precauciones para evitar errores	85
3.8 PUNTO DE REBLANDECIMIENTO EN CEMENTOS ASFÁLTICOS	86
3.8.1 Objetivo de la prueba	86
3.8.2 Equipo y materiales	86
3.8.3 Preparación de la muestra	90
3.8.4 Ejecución de la prueba	91
3.8.5 Resultados	91
3.8.6 Recomendaciones para evitar errores	92
3.9 PRUEBAS EN EL RESIDUO DE LA PELÍCULA DELGADA DE CEMENTOS ASFÁLTICOS	92
3.9.1 Objetivo de la prueba	92
3.9.2 Equipo y materiales	93
3.9.3 Preparación de la muestra	95
3.9.4 Procedimiento de la prueba	95
3.9.5 Cálculos y resultados	96
3.9.6 Precauciones para evitar errores	98
3.10 MÓDULO REOLÓGICO DE CORTE DINÁMICO	99
3.10.1 Objetivo de la prueba	99
3.10.2 Equipo	99
3.10.3 Calibración del equipo	102
3.10.5 Preparación de la muestra	105
3.10.6 Determinación de las condiciones de prueba	106
3.10.7 Procedimiento de la prueba	108
3.10.8 Cálculos y resultados	109
3.10.9 Precauciones para evitar errores	111
3.11 RECUPERACIÓN ELÁSTICA EN DUCTILÓMETRO	112
3.11.1 Objetivo de la prueba	112
3.11.2 Equipo y materiales	112
3.11.5 Cálculos y resultados	116
3.11.6 Precauciones para evitar errores	116
3.12 SEPARACIÓN EN CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO	117
3.12.1 Objetivo de la prueba	117
3.12.2 Material y equipo	117

3.12.4 Procedimiento de la prueba	118
3.12.5 Cálculos y resultados	119
3.12.6 Precauciones para evitar errores	120
3.13 RESILIENCIA EN CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO	120
3.13.1 Objetivo de la prueba	120
3.13.2 Equipo y materiales	120
3.13.3 Preparación de la muestra	123
3.13.4 Procedimiento de la prueba	123
3.13.5 Cálculos y resultados	124
3.13.6 Precauciones para evitar errores	125
3.14 RECUPERACIÓN ELÁSTICA POR TORSIÓN EN CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO	125
3.14.1 Objetivo de la prueba	125
3.14.2 Equipo y materiales	125
3.14.3 Preparación de la muestra	128
3.14.4 Procedimiento de la prueba	128
3.14.5 Cálculos y resultados	129
3.14.6 Precauciones para evitar errores	129
CAPÍTULO 4.- MÉTODO UCL® (MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES)	130
4.1 Análisis por temperatura	132
4.2 Análisis por efecto del agua	133
4.3 Análisis por envejecimiento	133
CAPÍTULO 5.- FASE EXPERIMENTAL	135
5.1 Materiales	135
5.2 Fase Experimental	135
5.2.1 Muestreo de materiales	135
5.2.2 Fabricación de probetas	137
5.3 Procedimiento De Envejecimiento De Las Probetas.	142
5.4 Procedimiento De Inmersión En Agua	145
5.5 Ensayo De Las Probetas	146
5.5.1 Descripción de la prueba de desgaste.	146
5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	149
5.6.1 PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO	149
5.6.2 PRUEBA DE INMERSIÓN EN AGUA	152
5.6.3 PRUEBA DE LAS PROBETAS VÍRGENES.	154
CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES:	156
BLIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS	159

TABLAS

Tabla 1. 1	Componentes de un asfalto diluido	11
Tabla 1. 2	Modelo de Composición del Asfalto	15
Tabla 1. 3	Clasificación de los asfaltos dependiendo del vehículo de aplicación	18
Tabla 1. 4	Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60°C	19
Tabla 1. 5	Clasificación según contenido.	21
Tabla 1. 6	Clasificación de los asfaltos rebajados	22
Tabla 1. 7	Requisitos de calidad para cementos asfálticos AC-5 y AC-20 modificados	25
Tabla 1. 8	Requisitos de granulometría para hule molido	26
Tabla 1. 9	Requisitos emulsión asfáltica modificada	26
Tabla 1. 10	Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada y con la velocidad de operación.	28
Tabla 1. 11	Requisitos de calidad para cementos asfálticos Grado PG	29
Tabla 1. 12	Compuesto Típico Asfalto - Agregado	31
Tabla 3. 1	Número de muestras y nivel de muestreo en función del tirante de asfalto en el depósito	41
Tabla 3. 2	Composición de muestras integrales de materiales asfálticos que se almacenen en tanques cilíndricos horizontales	42
Tabla 3. 3	Número de depósitos a muestrear	44
Tabla 3. 4	Tamaños de viscosímetros estándar, radio capilar, factores de calibración aproximados (K) y rangos de viscosidad para viscosímetros capilares de vacío del Instituto del Asfalto (AIVV)	49
Tabla 3. 5	Tamaños de viscosímetros estándar, radio capilar, factores de calibración aproximados (K), y rangos de viscosidad para viscosímetros capilares de vacío Koppers modificados (MKVV)	50
Tabla 3. 6	Viscosidades estándar de aceites utilizados para la calibración de los viscosímetros	53
Tabla 3. 7	Tamaños nominales, factores de calibración aproximados (C), rangos de viscosidad y dimensiones para viscosímetros capilares de flujo inverso Zeitfuchs Cross-Arm	58
Tabla 3. 8	Viscosidades estándar de aceites utilizados para la calibración de los viscosímetros	61
Tabla 3. 9	Diferencias permisibles entre los valores de penetración considerados para el cálculo de resultados	80
Tabla 3. 10	Precisión del sistema de control y registro de datos	101
Tabla 5. 1	Resultados de la prueba de envejecimiento	149
Tabla 5. 2	Resultados expresados en porcentaje de pérdidas (promedios)	150
Tabla 5. 3	Resultados de la prueba de inmersión en agua.	152
Tabla 5. 4	Resultados de la prueba de inmersión en agua.	154

FIGURAS

Figura 1. 1	Regiones geográficas de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C.	20
Figura 1. 2	Regiones geográficas para la utilización recomendable de Cementos asfálticos Grado PG	28
Figura 2. 1	Relación general entre viscosidad y temperatura	33
Figura 2. 2	Relación Tensión-Fatiga entre asfaltos convencionales y modificados	37
Figura 3.1	Muestreadores para materiales asfálticos	40
Figura 3.2	Viscosímetro capilar de vacío del Instituto del Asfalto (AIVV)	48
Figura 3.3	Viscosímetro capilar de vacío Koppers modificado (MKVV)	50
Figura 3.4	Sistema de vacío sugerido para viscosímetros capilares de vacío	52
Figura 3.5	Viscosímetro Zeitfuchs Cross-Arm	59
Figura 3.6	Tubo de viscosidad Saybolt y boquilla con orificio Furol	65
Figura 3.7	Matraz aforado	65
Figura 3.8	Embudo para filtrado	67
Figura 3.9	Viscosímetro digital Brookfield	72
Figura 3.10	Penetrómetro para la prueba de penetración	76
Figura 3.11	Aguja para la prueba de penetración	76
Figura 3.12	Copa abierta de Cleveland	82
Figura 3.13	Montaje del equipo	82
Figura 3.14	Placa circular de apoyo para la copa de Cleveland	83
Figura 3.16	Anillo para la prueba de punto de reblandecimiento	87
Figura 3.17	Portanillos para la prueba de punto de reblandecimiento	87
Figura 3.18	Montaje del sistema de soporte	88
Figura 3.19	Guía para centrar la esfera	89
Figura 3.22	Reómetro de corte dinámico típico	100
Figura 3.23	Gráfica para definir los límites del comportamiento viscoelástico lineal de un cemento asfáltico	110
Figura 3.24	Ductilómetro	113
Figura 3.25	Molde para elaborar la briqueta	113
Figura 3.26	Penetrómetro	121
Figura 3.27	Esfera de penetración	121
Figura 3.28	Cilindro, semicorona graduada y molde para la muestra	126
Figura 3.29	Recipiente con la muestra y baño de agua	127
Figura 4. 1	Máquina de los ángeles.	131
Figura 4. 2	Horno eléctrico	132
Figura 5.1	Material lavado (retenido en malla #30)	136
Figura 5.2	Asfalto Modificado	136
Figura 5.3	Moldes para la fabricación de probetas	137
Figura 5.4	Contador del compactador Marshall	138
Figura 5.5	Compactador Automático Marshall	138
Figura 5.6	Mezcla homogenizada	139
Figura 5.7	Máquina compactadora	140
Figura 5.8	Probetas listas en proceso de enfriamiento	141
Figura 5.9	Probeta lista y marcada	141
Figura 5.10	Malla de alambre galvanizado	142
Figura 5.11	Malla de mosquitero	142
Figura 5.12	Colocación de las mallas.	143
Figura 5.13	Probeta preparada para la prueba de envejecimiento.	144
Figura 5.14	Máquina de inmersión de agua.	145
Figura 5.15	Registro del peso de la probeta	146
Figura 5.16	Congelador	148
Figura 5. 17	Probetas en el Congelador	148

Figura 5.18 Gráfica de resultados de las probetas sometidas a la prueba de envejecimiento	150
Figura 5.19 Gráfica de resultados de las probetas sometidas a la prueba de envejecimiento	151
Figura 5.20 Gráfica de resultados de las probetas sometidas a la prueba de Inmersión	153
Figura 5. 21 Gráfica de resultados de las probetas en estado virgen.	155

INTRODUCCIÓN

A través de los años hemos podido estudiar los diferentes tipos de materiales utilizados en la construcción. Sus características, usos y, desde luego, su origen... Es muy interesante estudiar en este caso al Asfalto, producto milenario y que gracias a la tecnología y al desarrollo de la humanidad ha variado su forma, su manejo, e, inclusive, sus características, haciéndolo más maleable para el hombre.

El ASFALTO es un producto viscoso cuyas características permiten utilizarlo en diferentes ramas de la construcción, por su versatilidad y fácil manejo.

Por ejemplo, en vialidad es utilizado como lecho de las carreteras o de las vías por donde transitan los vehículos, es perfecto como aislante en las estructuras, no el asfalto en sí, pero si un derivado o compuesto a base de este material. En la impermeabilización de losas es magnífico, y su historia y desarrollo comienza desde los principios de la vida cuando el asfalto era recuperado de las lagunas naturales o conocido como brea y vertido a las losas como impermeabilizante, que para aquel entonces eran más bien unas estructuras (las losas) a base de ramas secas y otros elementos; hoy en día este producto es aplicado en rollos compactos de asfalto y otros materiales que le dan ciertas propiedades y características que lo hacen mucho más versátil en la aplicación en obra.

Las metodologías tradicionales, para el análisis de la calidad de los agregados pétreos para pavimentos, incluyen pruebas como el Desgaste de Los Ángeles, Densidad, Absorción, etc. ensayos que nos indican las propiedades físicas del agregado pétreo, sin embargo difícilmente se analiza el comportamiento que tiene en combinación con el asfalto. El presente trabajo pretende demostrar la importancia de analizar la afinidad entre el pétreo y el asfalto de una forma mecánica, para garantizar que las mezclas asfálticas se comporten adecuadamente y la conveniencia del empleo de polímeros promotores de adherencia en ciertos casos.

Por otro lado se estudiara el comportamiento del asfalto mediante un método no convencional llamado “**Método Universal de Caracterización de Ligantes**” (Método UCL®), el cual analiza asfaltos normales y modificados.

En fin el asfalto es un material importantísimo para la construcción civil y el cual debe ser tomado en cuenta siempre.

La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de los caminos.

Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito (peso vehicular).

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento), de las mezclas que componen las capas de rodamiento, aumentando la rigidez. Por otro lado disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad. Finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

El ELVALOY® es terpolímero elastomérico que reacciona con el asfalto, por lo tanto no hay separación posible durante la transportación o el tendido, o si el asfalto es almacenado debido a condiciones laborales o de clima, Una vez que el ELVALOY® se une al asfalto permanece siendo parte integral del mismo. En otras palabras es un modificador de asfalto diseñado para contrarrestar los cuatro principales mecanismos de falla en los asfaltos.

Estos cuatro mecanismos de falla son:

- 1. Ahuellamiento.**
- 2. Agrietamiento por fatiga.**
- 3. Agrietamiento por baja temperatura.**
- 4. Desnudamiento de agregados.**

Dada la elasticidad y resiliencia proporcionadas por el elastómero, el ELVALOY® trabaja absorbiendo el impacto en el asfalto y ayuda a que el pavimento resista el rompimiento bajo el incesante golpeteo del tráfico. Los caminos protegidos con ELVALOY® muestran excepcional resistencia a la fatiga.

Los ciclos de temperatura influyen en la fisuración también. Gracias a sus características elastoméricas, el ELVALOY® hace más resiliente al asfalto, proporcionándole la habilidad de contraerse y expandirse con los cambios de temperatura.

En la actualidad cada día es más común que en la construcción de pavimentos asfálticos para carreteras, se utilicen polímeros para mejorar las condiciones físicas de las mezclas asfálticas.

Por todo lo anterior, se decidió realizar en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, un estudio sobre la influencia que tienen algunos polímeros que se ofrecen en el mercado mexicano, en el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo ciertas condiciones de temperatura.

El Método UCL® (Método Universal de Caracterización de Ligantes) ampliamente conocido en su aplicación para la caracterización de ligantes asfálticos, será utilizado en este caso para analizar como la utilización de un asfalto modificado con ELVALOY® permite mejorar la resistencia al desgaste y por consiguiente mejorar el comportamiento de las mezclas.

OBJETIVOS

Como objetivo principal de este trabajo de investigación es el demostrar el comportamiento de los asfaltos modificados, ejemplificando de una forma sencilla los resultados y los efectos que producen las condiciones de uso a las que esta sometido el asfalto todos los días.

En este trabajo se estudiaran las propiedades de un asfalto modificado con ELVALOY® tomando como principal la de la capacidad de adherir el material pétreo siendo esta una de las mas afectadas por las condiciones de uso (variación de temperatura, lluvias, inducción de calor, envejecimiento del asfalto entre otras)

Otro de los objetivos principales de este trabajo de investigación es ejemplificar la importancia del método UCL® (Método Universal de Caracterización de Ligantes), aplicado a asfaltos modificados que en este caso se utilizara un AC-20 modificado con ELVALOY® marca DuPont®, para lo cual nos basaremos en tres aspectos:

1. Efecto de envejecimiento:

Se revisara el comportamiento del asfalto modificado mediante la inducción de calor a las probetas por tiempos diferentes simulando así el efecto que el tiempo produce sobre el asfalto.

2. Efecto de la Temperatura:

Se analizara los efectos que produce las variaciones de calor al asfalto modificado.

3. Efecto de el Agua:

Se estudiara las consecuencias que provoca el agua sobre los asfaltos modificados.

CAPÍTULO 1.- ASFALTO

1.1 ORIGEN DEL ASFALTO

Es muy conocido que el término "bitumen" se originó en Sánscrito, donde la palabra "jatu" significa alquitrán y "jatubrit" significa la creación de alquitrán, palabra referida al alquitrán producido por resinas de algunos árboles. El equivalente en latín fue originalmente "gwitu-men" (cercano al alquitrán) y por otros "pixtu-men" (alquitrán burbujeado), cuya palabra fue acortada subsecuentemente a "bitumen" pasada luego del francés a inglés.

Existen varias referencias al asfalto en la Biblia, aunque la terminología usada puede ser bastante confusa. En el libro del Génesis se refiere al impermeabilizante del Arca de Noe, el cual fue preparado con y sin alquitrán y de la aventura juvenil de Moisés en "Un Arca de Espadaña, pintarrajeada con lodo y con alquitrán".

Aún más confusas son las descripciones de La Torre de Babel. La Versión Autorizada de la Biblia dice: "Ellos tenían ladrillos por rocas y lodo para mortero", la nueva versión autorizada dice: "Ellos usaron ladrillos en vez de piedra y alquitrán en vez de mortero". La traducción de Moffat en 1935 dice: "Ellos usaron ladrillos en vez de piedras y asfalto en vez de mortero"; así como en la nueva versión oficial de la Biblia en español. Tampoco es desconocido que los términos bitumen, alquitrán y asfalto son intercambiables.

1.2 LOS PRIMEROS USOS DEL ASFALTO

En las vecindades de depósitos subterráneos de crudo de petróleo, láminas de estos depósitos pueden verse en la superficie. Esto puede ocurrir por fallas geológicas; la cantidad y naturaleza de este material que se observa naturalmente depende de un número de procesos naturales, los cuales pueden modificar las propiedades del material. Este producto puede ser considerado un "asfalto natural", a menudo siendo acompañado por materia mineral, y la mezcla y dependiendo de las circunstancias por las cuales hayan sido mezcladas.

Existen por supuesto grandes depósitos de crudo de petróleo en el medio ambiente y por miles de años estos han correspondido a láminas superficiales de asfalto "natural". Los antiguos habitantes de esas zonas no apreciaron rápidamente las excelentes propiedades impermeabilizantes, adhesivas y de preservación que tenía el asfalto y rápidamente dejaban de usar este producto para su disposición final. Por más de 5000 años el asfalto en cada una de sus formas ha sido usado como un impermeabilizante y agente ligante.

Los Sumerios, 3800 AC, usaron asfalto y se recuerda este como el primer uso de este producto. En Mohenjo Daro, en el valle Indus, existen tanques de agua particularmente bien preservados los cuales datan del 3800 AC. En las paredes de este tanque, no solamente los bloques de piedra fueron pegados con un asfalto "natural" sino que también el centro de las paredes tenían "nervios" de asfalto natural.

Este mismo principio se usa actualmente en el diseño de modernos canales y diques. Se cree que Nebuchadnezzar fue un hábil exponente del uso del asfalto debido a que existe la evidencia que el usaba el producto para impermeabilización de los techos de sus palacios y como un ingrediente en sus caminos empedrados. El proceso de momificación usado por los antiguos egipcios también testifica las cualidades preservativas del asfalto, aunque es una materia de disputa si se usó asfalto en vez de resinas.

Los antiguos usos "naturales" del asfalto descritos arriba demuestran que en aquellas partes habitadas del mundo donde estos depósitos de asfalto natural estaban fácilmente disponibles. En consecuencia esto parece haber sido poco desarrollo del arte en algún otro sitio. No fue hasta el fin del siglo XIX que alguno de los mayores usos del asfalto fueron descubiertos. En la mitad del siglo XIX se intentó que el asfalto fuera manufacturado para utilizarse superficies de carreteras. El mismo provenía de depósitos naturales europeos.

Así fue como se comenzaron a utilizar productos naturales que se obtenían del suelo, dando la llegada al carbón, alquitrán y luego el asfalto manufacturado a partir del crudo de petróleo. Durante el siglo XIX el uso del asfalto estaba limitado por su escasa disponibilidad, no obstante lo cual a mediados del mismo, la roca asfáltica participaba en la pavimentación de calles en Europa y después de 1870, en USA. El aporte intensivo del asfalto en obras viales ocurrió a principios del siglo XIX debido a dos acontecimientos casi simultáneos: la aparición

del automotor con rodado neumático que sustituyó a la llanta maciza de caucho ideada en 1869 y la explotación masiva del petróleo cuya industrialización lo convirtió en productor principal de asfaltos.

En el primer paso, el automóvil obtuvo pronto el favor del público que reclamó buenos caminos para mayor seguridad y confort. El transporte carretero comercial creó la dependencia "automóvil-camino" exigiendo amplias carreteras para más y mejores vehículos. En el segundo caso, el petróleo produjo importantes volúmenes de asfaltos aptos para un directo uso vial (cementos asfálticos) y asfaltos diluidos con las fracciones livianas (Emulsiones). Las emulsiones bituminosas de tipo aniónico aparecieron por entonces (1905) como moderador del polvo, mientras que las catiónicas lo hicieron entre 1951 y 1957 en Europa y EUA. Tanta actividad volcada al campo vial hizo que se hablara de la "era del automóvil y la construcción de carreteras". Los primeros trabajos asfálticos en calles y caminos fueron hechos con procesos sencillos para distribuir tanto el ligante como los pétreos (a mano), apareciendo después lanzas con pico regador y bomba manual.

El ritmo de las obras viales y la necesidad de mejorar los trabajos y reducir costos hizo progresar la operación vial. Los métodos manuales se mecanizaron apareciendo: regadores de asfalto a presión, distribuidores de piedra, aplanadoras vibrantes, rodillos con neumáticos de presión controlada, etc. Las mezclas asfálticas en sitio cambiaron niveladoras y rastras por motoniveladoras y plantas móviles o fijas. Las primeras mezclas calientes irrumpieron en el mercado alrededor de 1870 con plantas intermitentes de simple concepción. Hacia 1900 se había mejorado su diseño incluyendo tolvas de árido, elevadores de materiales fríos y calientes, secadores rotativos, tanques para incorporar el asfalto, mezcladoras que permitían cargar vagones a camiones. Entre 1930 y 1940 se incorporan cintas transportadoras, colectores de polvo y otros aditamentos, en las décadas del 50 y 60 se desarrollan plantas de mayor capacidad, hacia 1970 se introducen sistemas computarizados para dosificación y controles de elaboración, polvo y ruido. Todo este proceso mantuvo la operatoria fundamental: secado-cribado-proporcionado-mezclado.

En 1910 existían en USA. pequeñas plantas en caliente, de mezclado en tambor que hacia 1930 fueron reemplazadas por las de mezclador continuo, de mayor producción. En 1960 el procedimiento de secado y mezclado en tambor fue rescatado y actualmente estas plantas (tambor mezclador) producen mezclas de gran calidad y compiten además en el reciclado de pavimentos. Los silos para acopio de mezcla caliente forman parte de las plantas de tambor mezclador; también suelen encontrarse estos sitios en instalaciones discontinuas para independizar las operaciones de carga de los camiones, o silos de gran capacidad, dotados de revestimiento aislante, permiten al acopio de mezcla caliente durante varios días conservando su trabajabilidad.

La terminadora o pavimentadora asfáltica, fue introducida por Barber Greene en 1937, después de siete años de experimentación, luego producidas por otras compañías con algunas variantes, pero manteniendo el esquema operativo original. En el campo de nuevos materiales ingresaron los aditivos: polímeros, fibras, agregados livianos, betunes sintéticos incoloros y mejoradores de adherencia. Los trabajos asfálticos se diversificaron: lechadas bituminosas, microaglomerados, carpetas de espesor reducido, mezclas drenantes, mezclas o lechadas en color para pisos o como seguridad vial.

1.3 ASFALTOS NATURALES

1.3.1 Asfalto

Es una sustancia negra, pegajosa, sólida o semisólida según la temperatura ambiente; a la temperatura de ebullición del agua tiene consistencia pastosa, por lo que se extiende con facilidad. Se utiliza para revestir carreteras, impermeabilizar estructuras, como depósitos, techos o tejados, y en la fabricación de baldosas, pisos y tejas. No se debe confundir con el alquitrán, que es también una sustancia negra, pero derivada del carbón, la madera y otras sustancias.

El asfalto se encuentra en depósitos naturales, pero casi todo el que se utiliza hoy es artificial, derivado del petróleo. Para pavimentar se emplean asfaltos de destilación, hechos con los hidrocarburos no volátiles que permanecen después de refinar el petróleo para obtener gasolina y otros productos.

En la fabricación de materiales para tejados y productos similares se utilizan los asfaltos soplados, que se obtienen de los residuos del petróleo a temperaturas entre 204 y 316 °C. Una pequeña cantidad de asfalto se craquea a temperaturas alrededor de los 500 °C para fabricar materiales aislantes.

El asfalto natural se utilizaba mucho en la antigüedad. En Babilonia se empleaba como material de construcción. En el Antiguo Testamento en los libros del Génesis y el Éxodo hay muchas referencias a sus propiedades impermeabilizadoras como material para calafatear barcos.

Los depósitos naturales de asfalto suelen formarse en pozos o lagos a partir de residuos de petróleo que resuman hacia la superficie a través de fisuras en la tierra. Entre ellos destacan el lago Asfaltites o mar Muerto, en Palestina; los pozos de alquitrán de La Brea, en Los Ángeles, en los cuales se han encontrado fósiles de flora y fauna prehistóricas; el lago de la Brea, en la isla de Trinidad, y el lago Bermúdez, en Venezuela. También se aprovechan los depósitos de rocas asfálticas o rocas impregnadas de asfalto. Otro tipo de asfalto de importancia comercial es la gilsonita, que se encuentra en la cuenca del río Uinta, al suroeste de Estados Unidos, y se utiliza en la fabricación de pinturas y lacas.

El asfalto es muy utilizado para la pavimentación de carreteras, es un material negro bituminoso que suele obtenerse a partir del petróleo crudo. Se aplica uniformemente sobre la superficie de la carretera y se apisona para alisarlo.

Los materiales asfálticos se conocen y han sido utilizados en la construcción de caminos y edificios desde la antigüedad. Los primeros asfaltos eran naturales y se encontraban en estanques y lagos de asfalto; en la actualidad provienen de los residuos del petróleo refinado.

El asfalto que es derivado negro o castaño oscuro del petróleo, es diferente del alquitrán, que es el residuo de la destilación destructiva de la hulla. El asfalto consta de hidrocarburos y sus derivados y es completamente soluble en bisulfuro de carbono (CS₂). Es el residuo del petróleo, después de extraer, por refinación o destilación, los componentes más volátiles. Se le conoce con el nombre popular de *chapopote*.

El asfalto es de naturaleza coloidal. Los componentes de más alto peso molecular constituyen la fase dispersa (micelas) y los componentes de bajo peso molecular constituyen la fase continua (intermicelar). Los asfáltenos constituyen la fracción del asfalto que permanece disuelta cuando se precipitan los asfaltos en la solución disolvente. En el asfalto no diluido, los maltenos forman un aceite viscoso, castaño oscuro.

Los porcentajes de asfáltenos y maltenos presentes en el asfalto se pueden determinar en un disolvente dado y se deben definir en términos de ese disolvente a fin de que tengan sentido. Por ejemplo, en la tabla 1.1 se muestran los componentes fraccionales el asfalto después de diluirlo 100 veces con *n*-pentano.

Describiendo la estructura del coloide, las resinas circundan en forma inmediata a los asfáltenos y los aceites rodean a ese compuesto. Dado que es difícil determinar las diferentes proporciones de hidrocarburos presentes en el asfalto, se usa la relación entre el número de átomos de carbono y el número de átomos de hidrógeno (relación C/H) para caracterizar la composición química de las fracciones del asfalto. La relación da una indicación del grado de saturación de la mezcla de hidrocarburos y se puede correlacionar con las propiedades de los diferentes asfaltos.

Tabla 1. 1 Componentes de un asfalto diluido

FRACCIÓN	PESO MOLECULAR	C/H	CANTIDAD, %
ASFALTENOS	1000	9 - 10	10 - 20
MALTENOS			
a. RESINAS	800	8	10
b. ACEITES	600	6	70 - 80

Estos asfaltos pueden clasificarse como:

Asfaltos Nativos, sólidos o semisólidos

1) Puros o casi puros.

Asfalto del lago Bermúdez.

2) Asociados con materia mineral

Asfaltos del lago Trinidad.

Asfaltos del Iraq, Boeton y Selenitza.

Asfaltos de roca europeos y americanos.

3) Asfaltitas duras

Gilsonita, Grahamita, Pez lustrosa, Manjak

El asfalto del lago Bermúdez se presenta en el lago del mismo nombre, en Venezuela. Este se ha empleado en la fabricación de asfalto emulsificado para carreteras y calles, en tejados y como impermeabilizante. Aún en nuestros días se usa como aglutinante para pisos de carreteras y como material para pavimentos. El asfalto del lago Bermúdez se refina al vapor igual que el del lago Trinidad, proceso que se analizará mas adelante.

El asfalto del lago Trinidad se presenta en el lago de asfalto del lago de la isla Trinidad y es considerado como el depósito más importante de asfalto natural en todo el mundo. Este asfalto es bastante duro y hay que extraerlo usando maquinaria especial para dicho fin, tanto así que resulta apto para soportar el ferrocarril que sirve como medio de transporte en la zona. El asfalto del lago Trinidad contiene bastante materia mineral, algunas fácilmente visibles al microscopio, que se depositan cuando se altera la viscosidad con calor y la viscosidad de sedimentación sigue aproximadamente la ley de Stoke.

En la refinería, se calienta el asfalto crudo en grandes calderas abiertas provistas de serpentinas de vapor para expulsar el agua, y después se cuele. Este producto se conoce con el nombre de Asfalto Trinidad Refinado. El asfalto refinado se reblandece mezclándolo con un residuo líquido de petróleo que sirve de fúndente, y el producto se llama cemento asfáltico o cemento de asfalto del lago Trinidad.

El asfalto del lago Trinidad se adapta bien a las mezclas con alquitrán de hulla para disminuir la volatilidad de éste y hacerlo más consistente y más estable a los aumentos de temperatura. Este asfalto es miscible con casi todos los demás asfaltos y betúmenes naturales, aceites vegetales y minerales, ceras, breas y alquitrán de hulla. Casi todos los usos de éste asfalto exigen una manipulación a temperatura elevada, y las mezclas con materiales bituminosos más blandos o más duros suelen hacerse a temperaturas comprendidas entre 107 y 204 °C. Este asfalto se emplea como material de pavimentación, y en la fabricación de materiales asfálticos para tejados, materiales impermeabilizantes, mástic asfáltico, revestimiento para tuberías y conductos, y para otros usos especializados.

Los principales yacimientos de roca asfáltica están en Europa y Norteamérica, pero hay depósitos en todo el mundo. Los asfaltos de roca norteamericanos suelen componerse de arenisca o caliza o una mezcla de ambas, impregnadas con betún; los calizos se diferencian por su estructura física de los que contienen arenisca.

Los asfaltos de roca se usan para pavimentar calles. Se mezclan uno o varios asfaltos de roca pulverizados para obtener una composición media, se extiende la mezcla, se aplica calor si es necesario, y por medio de presión se iguala la superficie. La roca pulverizada se mezcla con asfalto del lago Trinidad u otros asfaltos para obtener un mástique que es mucho más rico

en betún que las mezclas de rocas. Este mástic, aplicado a una base de concreto o de madera a una temperatura de 177 a 232 °C, se utiliza en la fabricación de materiales para tejados, pisos y revestimientos impermeabilizadores para estanques y depósitos. Una buena parte del mástic utilizado en Estados Unidos para hacer revestimientos o pisos impermeabilizados o resistentes a los ácidos no contiene asfalto nativo de roca, sino mezclas de otros asfaltos con polvo de piedra, rocas trituradas, arena o grava.

La gilsonita o caucho mineral, sólo se presenta naturalmente en la cuenca del río Uintah, en Utah y Colorado, Estados Unidos. Es uno de los bitúmenes naturales más puros que se conocen y se distingue fácilmente de las demás asfaltitas por su color pardo, su peso específico más bajo, su contenido fijo de carbono y poco azufre. Las calidades comerciales son; selecto, segundo (corriente) y azabache. Se distinguen por el punto de reblandecimiento y el comportamiento en los solventes derivados de petróleo.

La gilsonita se emplea mucho en la fabricación de barnices negros mezclándola con aceites secantes y resinas, residuos de petróleo y otros asfaltos, con todos los cuales es miscible en todas proporciones. Se emplea también mucho en la fabricación de artículos moldeados termoplásticos, revestimientos para frenos, pisos de mástique, losetas asfálticas, compuestos saturantes para alambres aislados, bandas de transmisión, tejidos impregnados, pinturas para maderas y revestimientos de oleoductos. En virtud de su elevada resistencia dieléctrica, se usa en muchos compuestos eléctricos, y su color pardo hace que se utilice en tintas de imprenta, especialmente en los tipos pardos para rotograbado.

A diferencia de casi todos los demás asfaltos naturales o de petróleos, la gilsonita se mezcla en casi todas las proporciones con ceras para formar compuestos estables. Cuando se emplea en proporciones pequeñas en mezclas de cera-asfaltos, actúa como portador e impide la separación de la cera y el asfalto. Añadiendo una pequeña proporción de gilsonita al fundente antes de soplar el asfalto, el producto es menos grasiento o aceitoso. Cuando se añade a un asfalto oxidado, de temperatura de reblandecimiento elevada, la gilsonita reduce la penetración y el punto de reblandecimiento; pero cuando se añade a un asfalto oxidado de temperatura de reblandecimiento baja, reduce la penetración y eleva el punto de reblandecimiento.

La grahamita es una asfaltita que se encuentra en diversos lugares de los Estados Unidos, Cuba y Sudamérica. Los yacimientos de Oklahoma se explotaron bastante durante algunos años, pero en la actualidad casi toda la grahamita empleada procede de las minas de Cuba. La grahamita se diferencia de la gilsonita y pez lustrosa en su contenido más alto de carbono fijo y en que se hincha pero no se funde, cuando se calienta. Su coloración es más negra que la gilsonita y la pez lustrosa.

En los últimos años, la grahamita no se ha empleado tanto. Sus usos estaban orientados para revestimiento de tuberías, fieltros para techumbres y relleno de juntas de expansión en pavimentos rígidos. En la actualidad ha sido reemplazada por asfaltos de petróleo oxidado.

La pez lustrosa es un intermedio entre la gilsonita y la grahamita. Tiene un peso específico más elevado y un punto de fusión más alto. Se funde también con más dificultad, es menos soluble en nafta de petróleo, sin embargo su solubilidad en sulfuro de carbono pasa del 95%.

Se prefiere la pez lustrosa, de la isla de Barbados (Manjak), en la fabricación de barnices y lacas a causa de su lustre y su intenso color negro. La pez procedente de Cuba es muy variable y no tiene ninguna norma especial de calidad, sin embargo es la más conocida y utilizada de las Antillas y otros sitios. Se ofrece a veces como sustituto de la gilsonita

1.3.2 Composición del asfalto

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos, en el cual es difícil establecer una distinción clara entre la fase continua y la dispersa.

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 de otra manera insolubles asfáltenos. Los maltenos y asfáltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites.

Tabla 1. 2 Modelo de Composición del Asfalto

Asfáltenos	Maltenos
>Compuestos Polares >Hidrocarburos Aromáticos >Peso molecular mayor 1.000 Precipitan como sustancias oscuras por dilución con parafinas de bajo punto de ebullición (pentano-heptano)	>No polares >Hidrocarburos Alifáticos más Nafténicos y Aromáticos >Peso molecular hasta 1.000 Medio continuo

1.3.3 Asfaltos derivados de petróleo

Los asfaltos mas utilizados en el mundo hoy en día, son los derivados de petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Representan más del 90 % de la producción total de asfaltos. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto y a veces casi en su totalidad. 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 en el cual se separan las fracciones livianas como la nafta y kerosene 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 (CS₂). 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. El alquitrán tiene bajo contenido de betún, mientras que el asfalto está compuesto casi enteramente por betún, entre otros compuestos.

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.

1.3.4 Obtención de asfaltos 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.

1.3.4.1 Destilación primaria:

Es la primera 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 a esta temperatura y se transforman en vapor. La mezcla de vapores y líquido caliente pasa a una columna fraccionadora. 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.

1.3.4.2 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 fraccionadora, 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, 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.

1.3.4.3 Desasfaltización con propano o butano:

El residuo de vacío obtenido por destilación al vacío, 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 a 120 °C). El gas licuado extrae el aceite y queda un residuo semisólido llamado "bitumen".

1.3.4.4 Oxidación del asfalto

Es un proceso químico que altera la composición química del asfalto. El asfalto está constituido por una fina dispersión coloidal de asfáltenos y maltenos. Los maltenos actúan como la fase continua que dispersa a los asfáltenos. Las propiedades físicas de los asfaltos obtenidos por destilación permiten a los mismos ser dúctiles, maleables y reológicamente aptos para su utilización como materias primas para elaborar productos para el mercado vial. Al "soplar" oxígeno sobre una masa de asfalto en caliente se produce una mayor cantidad de asfáltenos en detrimento de los maltenos, ocasionando así de esta manera una mayor fragilidad, mayor resistencia a las altas temperatura y una variación de las condiciones reológicas iniciales.

Los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, como se indica en la Tabla 1.3 y se detalla a continuación.

Tabla 1. 3 Clasificación de los asfaltos dependiendo del vehículo de aplicación

Material asfáltico	Vehículo para su aplicación	Usos más comunes
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, mezclas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, mezclas, morteros, riegos y estabilizaciones.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de subbases y bases hidráulicas.

1.4 CEMENTOS ASFÁLTICOS

Los cementos asfálticos son los que se obtienen del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo. Según su viscosidad dinámica a sesenta (60) grados Celsius, los cementos asfálticos se clasifican como se indica en la Tabla 1.4, donde se señalan los usos más comunes de cada uno.

Tabla 1. 4.- Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60°C

Clasificación	Viscosidad a 60°C Pa·s (P [1])	Usos más comunes
AC-5	50 ± 10 (500 ± 100)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 1. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.
AC-10	100 ± 20 (1000 ± 200)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 1. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 1.
AC-20	200 ± 40 (2000 ± 400)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 en la Figura 1. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 1.
AC-30	300 ± 60 (3000 ± 600)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 4 en la Figura 1. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zonas 3 y 4 en la Figura 1. • En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos de impregnación.

[1] Poises

1.5 EMULSIONES ASFÁLTICAS

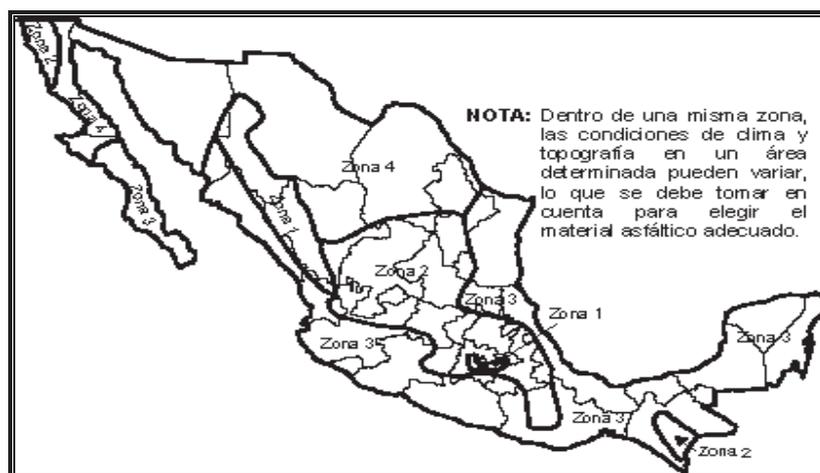
Las emulsiones asfálticas son materiales asfálticos líquidos estables, constituidos por dos fases no miscibles, en los que la fase continua de la emulsión está formada por agua y un agente emulsificante, y la fase discontinua por pequeños glóbulos de cemento asfáltico. Se denominan emulsiones asfálticas aniónicas cuando el agente emulsificante confiere polaridad electronegativa a los glóbulos y emulsiones asfálticas catiónicas, cuando les confiere polaridad electropositiva.

1.5.1 Las emulsiones asfálticas pueden ser de los siguientes tipos:

De rompimiento rápido, que generalmente se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos, a excepción de la emulsión ECR-60, que no se utilizará en la elaboración de éstas últimas.

De rompimiento medio, que normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos en la mezcla es igual que dos (2) por ciento o menor, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.

Figura 1. 1.- Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C.



De rompimiento lento, que comúnmente se utilizan para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas.

Para impregnación, que particularmente se utilizan para impregnaciones de subbases y/o bases hidráulicas.

Superestables, que principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación de pavimentos.

Según su contenido de cemento asfáltico en masa, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se indica en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5 .- Clasificación según contenido.

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

1.6 ASFALTOS REBAJADOS

Los asfaltos rebajados, que regularmente se utilizan para la elaboración de carpetas de mezcla en frío, así como en impregnaciones de bases y subbases hidráulicas, son los materiales asfálticos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente, clasificados según su velocidad de fraguado como se indica en la Tabla 1.6 .

Tabla 1. 6 .- Clasificación de los asfaltos rebajados

Clasificación	Velocidad de fraguado	Tipo de solvente
FR-3	Rápida	Nafta, gasolina
FM-1	Media	Queroseno

1.7 MATERIALES ASFÁLTICOS MODIFICADOS

A continuación se mostraran las características de calidad de los materiales asfálticos modificados que se utilicen en la elaboración de carpetas y mezclas asfálticas.

1.7.1 Definición y clasificación

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero o de hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación. Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo. Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

1.7.2 Polímero tipo I

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB), entre otras.

Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

1.7.3 Polímero tipo II

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

1.7.4 Polímero tipo III

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo plastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

1.7.5 Hule molido de neumáticos

Es un modificador de asfaltos que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta, tratamientos superficiales.

1.8 REQUISITOS DE CALIDAD

El empleo de los modificadores está condicionado al análisis de las ventajas que se obtengan de ellos para mejorar el comportamiento mecánico y la duración de los trabajos de

pavimentación en cada caso específico y de acuerdo con las condiciones climáticas, de tránsito, la rigidez de la estructura del pavimento, la disponibilidad de los materiales, el periodo de vida útil considerado en el diseño, la estrategia de mantenimiento y el costo de operación de los vehículos, entre otros. Su uso depende de la evaluación económica de su aplicación, en comparación con otras opciones. Corresponde al proyectista la selección del tipo de modificador a emplear y su dosificación, para cumplir con los parámetros de comportamiento deseados.

Los materiales asfálticos modificados, dependiendo del tipo de modificador empleado, cumplirán, en general, con los requisitos de calidad que se indican a continuación; sin embargo, podrán existir variaciones si el proyectista así lo considera en su diseño.

1.8.1 Cemento asfáltico modificado

Los cementos asfálticos clasificados como AC-5 y AC-20 según su viscosidad dinámica a sesenta (60) grados Celsius, una vez modificados cumplirán con los requisitos que se establecen en la Tabla 1.7. En el caso del asfalto modificado con hule molido, dependiendo del equipo para calentar los componentes de la mezcla, el hule molido cumplirá con una de las granulometrías que se indican en la Tabla 1.8.

1.8.2 Emulsión asfáltica modificada

Las emulsiones elaboradas con asfalto AC-5 modificado con polímero tipo I ó II, cumplirán con las características establecidas en la Tabla 1.9.

1.9 MEZCLADO DE LOS MODIFICADORES CON EL CEMENTO ASFÁLTICO

El mezclado de los modificadores, se efectuará en una planta industrial, utilizando los equipos especiales adecuados para el tipo de modificador que se emplee, a menos que, de acuerdo con las indicaciones del proveedor del modificador, no se requiera de dicho equipo.

Tabla 1. 7 .- Requisitos de calidad para cementos asfálticos AC-5 y AC-20 modificados

Características	Tipo de cemento asfáltico (Tipo de modificador)				
	AC-5 (Tipo II)	AC-20 (Tipo I)	AC-20 (Tipo II)	AC-20 (Tipo II)	AC-20 (Hule molido)
Del cemento asfáltico modificado:					
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C; s, máximo	500	1000	1000	1000	
Viscosidad rotacional Brookfield a 135°C; Pa s, máximo	2	4	3	4	
Viscosidad rotacional Brookfield (tipo Haake) a 177°C; Pa s, máximo					7
Penetración: • A 25°C, 100 g, 5 s; 10-1 mm, mínimo • A 4°C, 200 g, 60 s; 10-1 mm, mínimo	80 40	40 25	40 25	30 20	30 15
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	220	230	230	230	230
Punto de reblandecimiento; °C, mínimo	45	55	55	53	57
Separación, diferencia anillo y esfera; °C, máximo	3	3	3	4	5
Recuperación elástica por torsión a 25°C; %, mínimo	25	35	30	15	40
Resiliencia, a 25°C; %, mínimo	20	20	20	25	30
Del residuo de la prueba de la película delgada, (3,2 mm, 50 g):					
Pérdida por calentamiento a 163°C; %, máximo	1	1	1	1	1
Penetración a 4°C, 200 g, 60 s; 10-1 mm, mínimo					10
Penetración retenida a 4°C, 200 g, 60 s; %, mínimo	65	65	65	55	75
Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C; %, mínimo	50	60	60	30	55
Incremento en temperatura anillo y esfera; °C, máximo					10
Módulo reológico de corte dinámico a 76°C (G*/sen δ); kPa, mínimo		2,2	2,2	2,2	2,2
Módulo reológico de corte dinámico a 64°C (G*/sen δ); kPa, mínimo	2,2	--			
Angulo fase (δ) [visco-elasticidad], a 76°C; ° (grados), máximo		75	70	75	
Angulo fase (δ) [visco-elasticidad], a 64°C; ° (grados), máximo	75	--			

Tabla 1. 8.- Requisitos de granulometría para hule molido

Malla		Tamaño nominal		
Abertura mm	Designación	H 20 % que pasa	H 40 % que pasa	H 80 % que pasa
2	N°10	100		
1,18	N°16	75 – 100		
0,85	N°20	59 – 90	100	
0,6	N°30	25 – 60	75 – 100	100
0,425	N°40	10 – 40	55 – 90	80 – 100
0,3	N°50	0 – 20	25 – 60	60 – 100
0,15	N°100	0 – 10	0 – 30	4 – 70
0,075	N°200	0 – 5	0 – 10	0 – 20
Contenido mínimo de hule en el asfalto en masa; %		17	15	12

Tabla 1. 9.- Requisitos emulsión asfáltica modificada

Características	Valor
De la emulsión:	
Contenido de cemento asfáltico en masa; %, mínimo	60
Viscosidad Saybolt - Furol a 50°C; s	50-200
Asentamiento en 5 días; diferencia en %, máximo	3
Retenido de peso en malla N°20 en la prueba del tamiz; %, máximo	0,1
Carga eléctrica de las partículas	(+)
Disolvente en volumen; %, máximo	3
Demulsibilidad; %, mínimo	60
Índice de ruptura; %	80-140
Del residuo de la destilación:	
Penetración [1] a 25°C, en 100 g y 5 s; 10-1 mm	100-200
Ductilidad a 4°C, 5 cm/min; cm, mínimo	30
Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C, 20 cm, 5 min; %, mínimo	40
Recuperación elástica en ductilómetro a 10°C, 20 cm, 5 min; %, mínimo	50

[1] En climas que alcancen temperaturas iguales que 40°C o mayores, la penetración en el residuo de la destilación de las emulsiones asfálticas modificadas con polímero, en el proyecto se puede considerar de $50 \text{ a } 90 \times 10^{-1} \text{ mm}$.

En el caso de que el asfalto modificado con polímero presente problemas de estabilidad o de separación, se utilizará un agente estabilizador o antiseparador recomendado por el fabricante del modificador.

1.10 CEMENTOS ASFÁLTICOS GRADO PG

Son aquellos cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un desempeño adecuado para resistir deformaciones o agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga, en condiciones de trabajo que se han correlacionado con ensayos especiales y simulaciones de envejecimiento a corto y a largo plazo. Estos ensayos miden propiedades físicas que pueden ser directamente relacionadas, mediante principios de ingeniería, con el comportamiento en obra, y forman parte de los productos del Programa de Investigación de Carreteras desarrollado por la Unión Americana, conocida como la Tecnología SHRP.

1.10.1 Grado de desempeño (PG)

El grado de desempeño o grado PG es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico mas adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del transito a que estará sujeta durante su vida útil.

Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como 64 °C y tan bajas como -22°C. Las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de 6 grados. Sin embargo, generalmente las temperaturas máximas se consideran de 64 y 88°C y las mínimas de -40 y -20°C.

Los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el país, sin embargo, para fines prácticos, es recomendable seleccionar un cemento asfáltico que corresponda a uno de los 3 grados PG que se indican en la Figura 1.2, de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pretenda utilizar, de entre las zonas en que se ha dividido la Republica Mexicana que se muestran en la misma figura, pero considerando que dentro de una misma zona, las condiciones del clima en un área determinada pueden variar, lo que se debe de tomar en cuenta para elegir el Grado PG adecuado.

La temperatura máxima del Grado PG seleccionado según el clima, se ajusta de acuerdo con la intensidad de tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento de diez (10) años y de acuerdo con la velocidad de operación, como se indica en la Tabla 1.10.

Figura 1. 2 .- Regiones geográficas para la utilización recomendable de Cementos asfálticos Grado PG

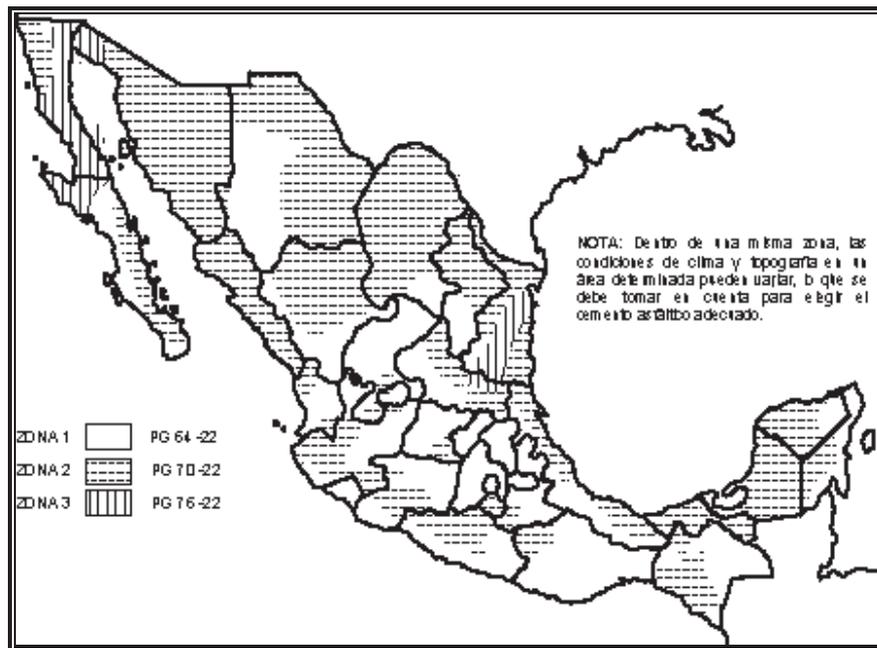


Tabla 1. 10 .- Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada y con la velocidad de operación.

Intensidad del tránsito (ΣL_{10}) [1]	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (Entre 10 y 30 km/h)	Ajuste por tránsito detenido (Cruceros)
	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
$\Sigma L_{10} < 106$	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
$106 \leq \Sigma L_{10} \leq 107$	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
$\Sigma L_{10} > 107$	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

Tabla 1. 11.- Requisitos de calidad para cementos asfálticos Grado PG

Grado de comportamiento	PG 64				PG 70				PG 76			PG 82			PG 88		
	- 22	- 28	- 34	- 40	- 22	- 28	- 34	- 40	- 22	- 28	- 34	- 22	- 28	- 34	- 22	- 28	- 34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C	64				70				76			82			88		
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C	>- 22	>- 28	>- 34	>- 40	>- 22	>- 28	>- 34	>- 40	>- 22	>- 28	>- 34	>- 22	>- 28	>- 34	>- 22	>- 28	>- 34
Asfalto original																	
Punto de inflamación Cleveland [1]; °C, mín.	230																
Viscosidad dinámica a 135°C[1]; Pa·s (P[2]), máximo	3																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) [1] [3]; kPa, mínimo •Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	1																
	64				70				76			82			88		
Después de prueba de película delgada y aire de horno [1]																	
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) [1]; kPa, mínimo •Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	2,2																
	64				70				76			82			88		
Después de envejecimiento en vasija de presión temperatura y aire																	
Temperatura de envejecimiento PAV; °C •En climas normales •En climas desérticos																	
	100				100				100			100			100		
	100				110				110			110			110		
Índice de endurecimiento físico [4], máximo	Reportar																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/sen δ) [1]; kPa, máximo •Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	5 000																
	25	22	19	16	28	25	22	19	31	28	25	34	31	28	34	31	28
Rigidez de Flexión S(t)[1] [5]; MPa, máximo (m=0,3 mín) •Temperatura de prueba @ 60 s, °C	300																
	- 12	- 18	- 24	- 30	- 12	- 18	- 24	- 30	- 12	- 18	- 24	- 12	- 18	- 24	- 12	- 18	- 24

[1] Determinado mediante el procedimiento de prueba correspondiente.

[2] Poises

[3] Para control de calidad de producción de asfaltos normales sin modificar, cuando sean líquido newtoniano, la viscosidad dinámica del cemento asfáltico original puede sustituir al módulo de corte dinámico G*/sen δ, a las temperaturas de prueba.

[4] El endurecimiento físico del asfalto es desarrollado de acuerdo con el número de muestras de viga, conforme a la determinación de la rigidez de flexión, mediante el Reómetro de flexión de viga BBR, excepto que las condiciones de tiempo se extiendan a 24 h y el valor m sea reportado únicamente para propósitos de información.

[5] Si la rigidez de flexión es menor de 300 MPa, no es necesario la prueba de tensión directa. Si la rigidez de flexión resulta entre 300 y 600 MPa, se requiere que la deformación a la ruptura en la prueba de tensión directa cumpla también con lo indicado en esta Tabla. El valor m requerido será satisfactorio en ambos casos.

1.11 CEMENTOS ASFÁLTICOS

El asfalto refinado para cumplir con las especificaciones para pavimentos se llama *cemento asfáltico*. A las temperaturas normales es semisólido y su grado de solidez se mide con una prueba de penetración. Se calienta hasta que se licua, antes de incorporarle el agregado en las mezclas para pavimentos.

Si el asfalto es tan blando que la prueba de penetración no es adecuada para medir su consistencia, se le denomina *asfalto líquido*. Se producen varios tipos de asfalto líquido:

- Asfalto de Curado Rápido (CR), que se licua con nafta o gasolina, ambas muy volátiles y que al evaporarse con rapidez lo que queda es el cemento asfáltico.
- Asfalto de Curado Mediano (CM), que es el cemento asfáltico licuado con un diluyente a base queroseno.
- Asfalto de Curado Lento (CL), que se mezcla con un aceite de baja volatilidad.
- Asfalto emulsificado, el cual se produce al mezclar agua con un agente emulsificador y cemento asfáltico.

Este sistema heterogéneo de glóbulos esféricos en el medio acuoso, se endurece cuando se evapora el agua.

Los pavimentos asfálticos constan de asfalto, agregados y vacíos (2 a 7% de aire). Una mezcla típica se presenta en la tabla 1.12.

Un pavimento asfáltico soporta la carga aplicada, por fricción y entrelazamiento de las partículas. Su resistencia es función de textura superficial (en particular del agregado fino) y la densidad (compacidad) del agregado. Es deseable una textura superficial áspera.

Las mezclas densas se obtienen con el uso de agregados con buena granulometría; el agregado fino llena los huecos que deja la estructura del agregado grueso. El agregado grueso es el que queda retenido en la malla N° 8; el agregado fino pasa por la malla n° 8 y el polvo mineral pasa por la malla N° 200. El polvo mineral tiende a estabilizar el asfalto. El cemento bituminoso liga entre sí a las partículas de agregado e impermeabiliza el pavimento.

Los espacios de aire permiten la expansión del cemento asfáltico o la compactación del compuesto aportando un espacio hacia el cual se mueve el cemento asfáltico en lugar de empujar a los agregados, separándolos.

Tabla 1. 12 Compuesto Típico Asfalto - Agregado

	% en peso	% en volumen
ASFALTO	6	14.4
AGREGADO GRUESO	53	43.7
AGREGADO FINO	35	33.4
POLVO MINERAL	6	4.9
AIRE	3.6

1.12 PRODUCTOS DE ASFALTO PARA LA CONSTRUCCIÓN

Por sus propiedades de resistencia al agua y su durabilidad, el asfalto se utiliza en muchas aplicaciones en la construcción. Para proteger contra humedad y para impermeabilización contra agua (con una o varias capas), se utilizan tres tipos de asfalto: Tipo A, un material blando, adhesivo, que fluye fácil, para aplicaciones subterráneas o en otras aplicaciones a temperaturas moderadas; Tipo B, un asfalto menos susceptible, para usarlo en aplicaciones sobre el nivel del suelo, pero donde las temperaturas no excedan 52 °C; Tipo C, para aplicaciones sobre el nivel del suelo; puede ser en superficies verticales expuestas a la luz solar directa u otras áreas en que las temperaturas excedan los 52°C.

Los asfaltos y productos d asfalto tienen un amplio uso para impermeabilizar techos. El asfalto se utiliza como aglutinante entre capas en los techados y para impregnación de los fieltros, rollos y tejas. Debe tenerse cuidado en no mezclar el asfalto y alquitrán, o sea, colocar capas de asfalto sobre fieltro saturado de alquitrán o viceversa, a menos que se revise su compatibilidad.

Por sus cualidades impermeables y su durabilidad el asfalto se emplea en construcción para impedir el paso del agua, amortiguar vibraciones y expansiones y servir como pavimento.

CAPÍTULO 2.- MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 Definición y clasificación

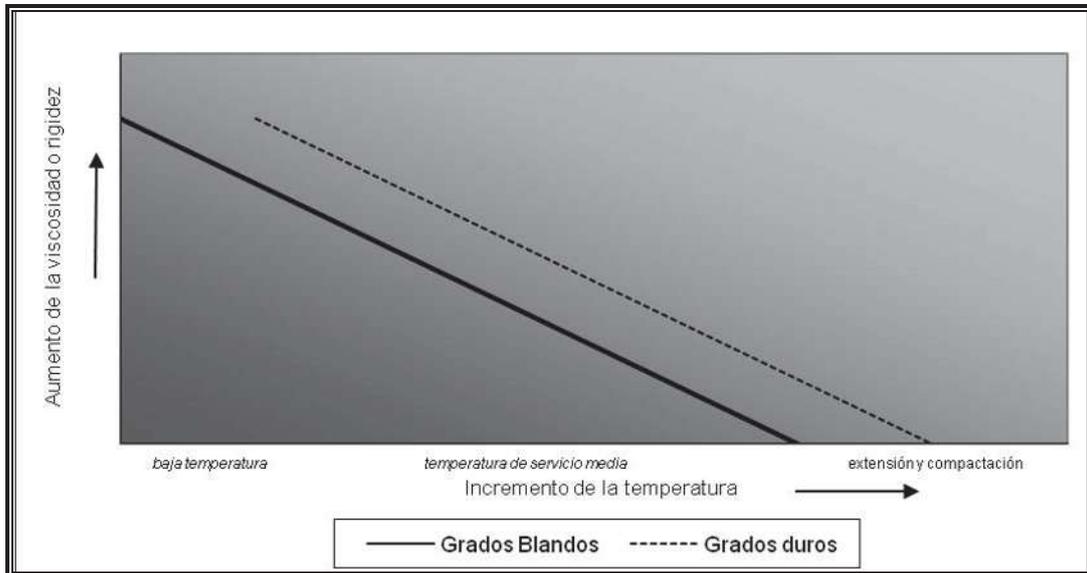
Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en uno pétreo. Aunque en una mezcla asfáltica, el asfalto sea minoritario en proporción, sus propiedades pueden influir de manera significativa en su comportamiento. El tipo de mezcla será el que, en gran medida, determine la contribución hecha por el ligante sobre todo el conjunto. Generalmente, las propiedades de las mezclas con granulometría continua dependen del enclavamiento o trabazón de los áridos, mientras que las preparadas con altos contenidos de mortero asfáltico dependen más de la rigidez de la proporción de ligante, polvo mineral y arena.

A altas temperaturas de servicio, puede que el ligante llegue a reblandecerse, facilitando la deformación de la mezcla (ahuellamiento). El riesgo de aparición de estas deformaciones es aún mayor en pavimentos sometidos a la circulación de vehículos pesados. De manera generalizada y sin tener en cuenta otros factores que pueden influir, se puede disminuir la probabilidad de aparición de estas deformaciones aumentando la rigidez del ligante mediante el empleo de un asfalto más duro.

Por otro lado a temperaturas de servicios bajas, el ligante se vuelve relativamente rígido y va perdiendo poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y siendo susceptible de fisuraciones. El grado de susceptibilidad a la fisuración está relacionado con la dureza del asfalto y su capacidad para absorber las sollicitaciones inducidas por el tráfico. Disminuyendo la dureza del asfalto, se minimizará el riesgo de fallo por fragilidad.

Entonces, debido a lo dicho precedentemente a la hora de buscar comportamientos globales satisfactorios de la mezclas bituminosas, la elección del asfalto adecuado para cada tipo de mezclas se vuelve un compromiso entre ambos extremos; ahuellamiento a altas temperaturas y fisuramiento por fragilidad térmica a bajas temperaturas. Donde mejorando el comportamiento a altas temperaturas, se influye negativamente en el comportamiento a bajas temperaturas.

Figura 2. 1 Relación general entre viscosidad y temperatura



Las mezclas asfálticas, según el procedimiento de mezclado se clasifican como se muestra a continuación:

2.2 Mezclas asfálticas en caliente

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

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

2.2.1 Mezclas asfálticas de granulometría densa.

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37.5mm (1 ½ in) y 9.5mm (3/8 in).

Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

2.2.2 Mezcla asfáltica de granulometría abierta.

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre 12.5mm (1/2 in) y 6.3mm (1/4 in).

Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodamiento, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa, con la finalidad principal de satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito, al permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodamiento, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. Las mezclas asfálticas de granulometría abierta no deben colocarse en zonas susceptibles al congelamiento ni donde la precipitación sea menor de 600mm por año.

2.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO

Son las elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales pétreos.

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

2.3.1.- Mezcla asfáltica de granulometría densa

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales pétreos, con tamaño nominal entre 37.5mm (1 ½ in) y 9.5mm (3/8 in). Normalmente se utiliza en los casos en la que la intensidad del tránsito es igual a 1 millón de ejes equivalentes o menor, en donde no se requiera de una alta resistencia estructural, para la construcción de carpetas para el refuerzo de pavimentos existentes, así como la reparación de baches.

2.3.2.- Mortero asfáltico

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua t arena con tamaño máximo de 2.36mm (N°8). Normalmente se coloca sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodamiento.

2.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL SISTEMA DE RIEGOS.

Son las que se construyen mediante la aplicación de uno o dos riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes. Las carpetas por el sistema de riegos se clasifican en carpetas de uno, dos y tres riegos. Las carpetas de un riego o la última capa de las carpetas de dos o tres riegos, pueden ser premezcladas o no. Normalmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, nueva o ya existente, como capa de rodamiento con el objeto de proporcionar resistencia al derrapamiento y al pulimento.

2.5 VENTAJAS EN LAS MEZCLAS EN SERVICIO

Los asfaltos modificados se deben aplicar, en aquellos casos específicos en que las propiedades de los ligantes tradicionales son insuficientes para cumplir con éxito la función para la cual fueron encomendados, es decir, en mezclas para pavimentos que están sometidos a solicitudes excesivas, ya sea por el tránsito o por otras causas como: temperaturas extremas, agentes atmosféricos, tipología del firme, etc. Si bien los polímeros modifican las propiedades reológicas de los asfaltos, estos deben mostrar ventajas en servicio; los campos de aplicación más frecuentes son:

- Mezclas drenantes: las mezclas drenantes tienen un porcentaje muy elevado de huecos en mezcla (superior al 20%) y una proporción de árido fino muy baja (inferior al 20%), por lo que el ligante debe tener una muy buena cohesión para evitar la disgregación de la mezcla. Además el ligante necesita una elevada viscosidad para proporcionar una película de ligante gruesa envolviendo los áridos y evitar los efectos perjudiciales del envejecimiento y de la acción del agua (dado a que este tipo de mezclas es muy abierta).

- Mezclas resistentes y rugosas para capas delgadas: La utilización de polímeros en este tipo de mezclas es para aumentar la durabilidad de las mezclas. Estos tipos de mezclas de pequeño espesor surgen dada a la rapidez de aplicación, lo que reduce al mínimo los tiempos de cortes de tráfico. Estas se utilizan para trabajos de conservación de rutas y vías urbanas, que exigen mezclas con alta resistencia y con una buena textura superficial.

La resistencia de estas mezclas se consigue con áridos de buena calidad, elevado porcentaje de filler (8 a 10%) y un asfalto modificado con polímeros.

La buena textura superficial para mejorar la adherencia de los vehículos se consigue mediante una granulometría discontinua (discontinuidad 2-6mm). En este tipo de mezclas es de vital importancia la adherencias con la capa subyacente (esta también influye en la durabilidad). Estas también deben ser resistentes, para soportar la acción del tránsito y el desprendimiento de los áridos.

Estas mezclas son denominadas también microaglomerados y tienen espesores menores a los 30 mm.

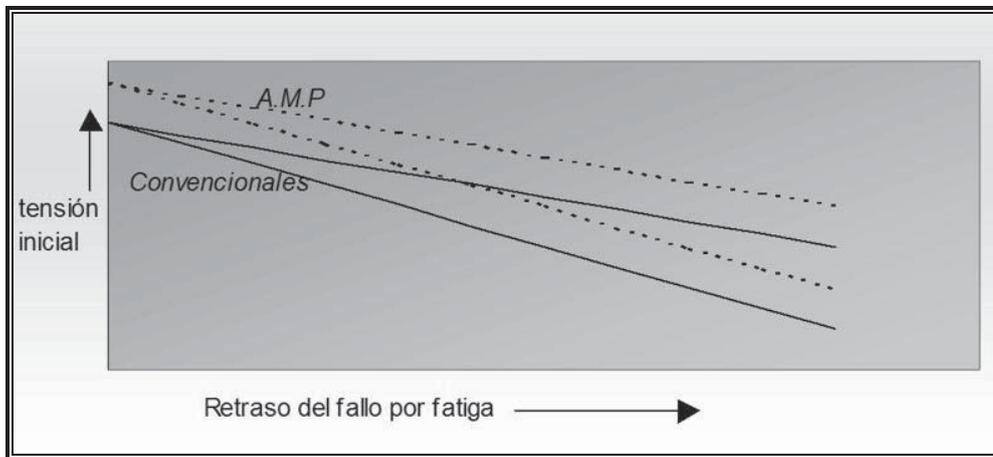
- Mezclas densas: Para las aplicaciones en las cuales se deban soportar tráfico intenso la mezcla bituminosa debe ser resistente al ahuellamiento. Al mismo tiempo, el material debe poder ser mezclado, extendido y compactado a temperaturas normales y no se debe volver frágil cuando la temperatura del pavimento descienda.

Como puede observarse existe una gran diferencia entre los resultados obtenidos sobre una muestra de mezcla asfáltica convencional y otra con una mezcla asfáltica modificada con polímeros, la mezcla modificada puede hacer frente al ahuellamiento con una marcada diferencia sobre la otra muestra.

En otras aplicaciones, el objetivo puede ser generar una mezcla flexible con el fin de reducir la posibilidad de rotura por fatiga. En estos casos, se necesitarán asfaltos modificados con polímeros, preferentemente de naturaleza elástica, para que la mezcla sea capaz de absorber las tensiones sin que se produzca la rotura.

Se han realizados varios ensayos que han demostrado que los asfaltos modificados con polímeros son capaces de asimilar mayores tensiones iniciales que las mezclas realizadas con una mezcla convencional.

Figura 2. 2 Relación Tensión-Fatiga entre asfaltos convencionales y modificados



- Tratamientos superficiales mediante el riego con gravilla: los Asfaltos modificados con polímeros y las emulsiones con ellos fabricadas, son adecuados para riegos en vías de fuerte intensidad de tráfico y/o en zonas climáticas de temperaturas extremas, porque el ligante debe tener una buena cohesión en un amplio intervalo de temperatura y una buena susceptibilidad térmica, con el fin de evitar exudación del ligante durante el verano, así como la pérdida de gravilla en el invierno.
- Membrana absorbente de tensiones: estas membranas tienen como misión retardar la propagación de fisuras de un firme a un nuevo refuerzo, por lo que deben estar fabricadas con Asfaltos modificados con polímeros para tener buena resistencia mecánica, resiliencia y flexibilidad para absorber las tensiones provocadas por el movimiento de las fisuras del firme.

2.6 DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS PREPARADAS CON POLÍMEROS

En función de no contar con experiencias muy válidas en cuanto a la durabilidad de mezclas bituminosas modificadas con polímeros, se hacen necesarios implementar métodos de laboratorio para evaluar el comportamiento a corto y largo plazo de envejecimiento.

Hay muy poca información de la degradación que sufren los polímeros componentes de los asfaltos durante su funcionamiento en servicio. En general los ensayos que se realizan para determinar la alteración que sufren los Asfaltos modificados con polímeros recuperados del pavimento son muy complicados por el hecho de que el calentamiento de la mezcla y posterior disolución con solvente para obtener la muestra para luego ser ensayada, puede afectar las propiedades de ciertos polímeros y falsear los resultados.

Como es bien conocido el envejecimiento o endurecimiento de los asfaltos ocurre durante los procesos de mezclado y colocación de las mezclas (envejecimiento a corto plazo) y durante su vida de servicio en el pavimento (envejecimiento a largo plazo).

Se han realizado ensayos (los mencionados precedentemente) sobre muestras de ligante y mezclas bituminosas modificadas con polímeros llegando a la conclusión que los Asfaltos modificados con polímeros, tienen un índice de envejecimiento más bajo que los convencionales.

CAPÍTULO 3.- MÉTODOS TRADICIONALES DE CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS

Los asfaltos deben de cumplir con ciertos requisitos de calidad, las cuales están marcadas en las normas de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), que son las rigen en este país para la construcción de caminos.

La caracterización de los asfaltos es realizada en un laboratorio de materiales antes de que el material sea empleado en la construcción de obras civiles. A continuación se mencionan las pruebas que se deben de aplicar a los materiales asfálticos para verificar si estos en realidad tienen las características apropiadas para su uso.

3.1.- MUESTREO DE MATERIALES ASFÁLTICOS.

El muestreo consiste en obtener una porción representativa del volumen de material asfáltico en estudio. Se realiza en materiales almacenados en uno o varios depósitos, o durante las maniobras de carga, descarga o aplicación. El muestreo incluye además las operaciones de envase, identificación y transporte de las muestras.

3.1.1.- Muestreo en un solo depósito.

El muestreo del material que esta almacenado en un solo depósito, como tanque estacionario, fosa o carro tanque, se hace tomando en cuenta lo siguiente:

3.1.1.1.- Consideraciones previas.

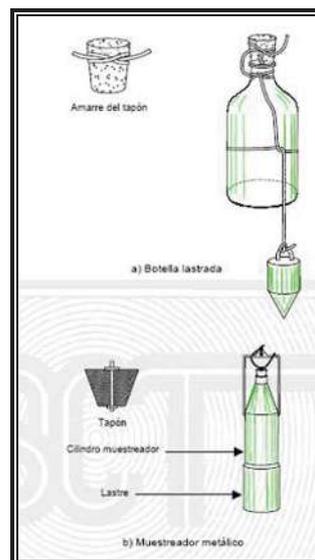
Previamente se consideran las condiciones en que se encuentra el material asfáltico, y en caso de que existan cantidades apreciables de impurezas tales como sedimentos, agua libre o espuma, entre otros, se espuma el volumen de estas y de ser necesario se toman muestras de dichas impurezas para su identificación.

Los materiales asfálticos sólidos o semisólidos se calientan solamente lo indispensable para facilitar su muestreo.

3.1.1.2.- Equipo.

Para la ejecución del muestreo, todo el equipo a emplear ha de estar en condiciones óptimas para su uso, limpio, completo en todas sus partes y sin desgaste. Consiste fundamentalmente en un muestreador como los que se ilustran en la Figura 3.1, formado por un recipiente metálico o de vidrio, convenientemente lastrado y provisto de un tapón de corcho que pueda retirarse desde el exterior mediante una cadena o cordel. El recipiente ha de estar sujeto al extremo de una varilla metálica o de madera, o bien a otro cordel, de tal forma que estando tapado y con la boca hacia arriba pueda sumergirse hasta la profundidad deseada.

Figura 3. 1.- Muestreadores para materiales asfálticos



3.1.1.3.- Obtención de la muestra.

Para la obtención de las muestras de material asfáltico de un depósito, se procede como se indica a continuación:

- 1) Para extraer las muestras, se sumerge el muestrador perfectamente seco y limpio, tomándolas, en su caso, de la parte media o de los tercios superior, medio e inferior del contenido del depósito. El número de muestras, así como su nivel de extracción, se determina según lo indicado con la Tabla 3.1.
- 2) Cada muestra será aproximadamente de 2 L en el caso de cementos asfálticos y de 4 L si se trata de emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados. Para obtener estos volúmenes es necesario llenar varias veces el muestrador, introduciéndolo a igual profundidad cuando se integre una misma muestra, evitando alterar las condiciones del material que esta siendo muestreado.

Tabla 3. 1 .- Número de muestras y nivel de muestreo en función del tirante de asfalto en el depósito

Tirante del material asfáltico en por ciento del tirante máximo(1)	Nivel de muestreo en por ciento del tirante máximo(1)			Numero total de muestras(2)
	Superior	Medio	Inferior	
100	80	50	20	3
90	75	50	20	3
80	70	50	20	3
70	---	50	20	2
60	---	50	20	2
50	---	40	20	2
40	---	---	20	1
30	---	---	15	1
20	---	---	10	1
10(3)	---	---	5	1

(1) El tirante máximo corresponde al diámetro vertical de tanques horizontales o la altura de depósitos verticales
(2) Se debe extraer una muestra por cada nivel señalado
(3) Cuando el tirante sea menor al 10% no se debe de utilizar el material asfáltico

- 3) Las muestras obtenidas a varias profundidades se depositan en diferentes recipientes con objeto de analizar cada una y determinar si existe heterogeneidad en el material; sólo en el caso de que éste vaya a ser homogeneizado para su utilización, se pueden mezclar para formar una muestra integral, como sigue:
- i. Si se trata de depósitos verticales, la muestra integral se forma con partes iguales de las muestras tomadas a diferentes profundidades según lo indicado en la Tabla 3.1

Tabla 3. 2.- Composición de muestras integrales de materiales asfálticos que se almacenen en tanques cilíndricos horizontales

Tirante del material asfáltico en por ciento del diámetro vertical	Porcentajes en volumen para formar la muestra integral		
	Superior	Medio	Inferior
100	30	40	30
90	30	40	30
80	20	50	30
70	---	60	40
60	---	50	50
50	---	40	60
40	---	---	100
30	---	---	100
20	---	---	100
10	---	---	100

3.1.2.- Muestreo en varios depósitos.

El muestreo del material asfáltico que esté envasado en varios recipientes o depósitos, como tambores o cuñetes se hace tomando en cuenta lo siguiente:

3.1.2.1.- Consideraciones previas.

Previamente al muestreo, se evalúa el estado físico en que se encuentra el material asfáltico y se agrupan los recipientes por lotes del mismo producto, origen y fabricación, para fijar el número de muestras parciales que deban de obtenerse.

3.1.2.2.- Equipo.

Para la ejecución del muestreo, todo el equipo a emplear ha de estar en óptimas condiciones para su uso, limpio, completo en todas sus piezas y sin desgaste.

El equipo que se requiere cuando el material asfáltico esté en estado líquido consiste fundamentalmente en un muestreador como los que se ilustran en la Figura 3.1, formado por un recipiente metálico o de vidrio, convenientemente lastrado y provisto de un tapón de corcho que pueda retirarse desde el exterior mediante una cadena o cordel. El recipiente ha de estar sujeto al extremo de una varilla metálica o de madera, o bien a otro cordel, de tal forma que estando tapado y con la boca hacia arriba pueda sumergirse hasta la profundidad deseada. o bien, si está en estado sólido o semisólido, herramientas como hacha, martillo y espátula.

3.1.2.3.- Obtención de la muestra.

Para la obtención de las muestras de material asfáltico envasado en varios recipientes o depósitos, se procede como se indica a continuación:

- 1) Según lo indicado en la Tabla 3.3, se determina el número de recipientes o depósitos a muestrear, seleccionándolos aleatoriamente. Si en un almacenamiento se encuentran depósitos con material asfáltico de dos o más lotes, se aplica lo anterior a cada uno de ellos.

Tabla 3. 3 .- Número de depósitos a muestrear

Numero de depósitos que forman el lote (Lo)	Numero de depósitos que deben muestrearse (n)
2 a 10	2
11 a 30	3
31 a 65	4
66 a 125	5
126 a 215	6
216 a 345	7
346 a 515	8
516 a 735	9
736 a 1000	10
más de 1000	$n \approx (Lo)^{(1/3)}$

- 2) En cada uno de los depósitos seleccionados de materiales asfálticos líquidos, se procede como se indica en la Fracción 3.1.1.3, excepto que el muestreo puede efectuarse en uno o dos niveles, obteniendo las muestras de lugares de que disten más de 10cm de la superficie del material y de las paredes del deposito. Las muestras tomadas se prueban en forma individual si así se requiere o bien, pueden mezclarse para formar una muestra integral.
- 3) Cuando se trate de materiales asfálticos sólidos o semisólidos, que no resulte práctico fluidificar para el muestreo, se utiliza hacha, cincel o herramienta similar. Una vez que han sido seleccionados los recipientes o depósitos de acuerdo con lo indicado en el inciso 1), se toman muestras de aproximadamente 2Kg, a una profundidad mayor de 10cm de la superficie del material asfáltico, en su parte central.

3.1.3.- Muestreo durante las maniobras de carga y descarga o de aplicación del material asfáltico.

El muestreo durante las maniobras de carga y descarga o de aplicación del material asfáltico, se hace directamente en el conducto de la descarga, tomando tres porciones, en recipientes de 2L de capacidad y de boca ancha, una al iniciarse la maniobra, otra a la mitad y

la última al final. Las porciones tomadas se mezclan en un recipiente limpio, del que se obtiene una muestra integral de 2L si se trata de cementos asfálticos o de 4L en el caso de emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados.

3.1.4.- Envase, identificación, transporte y almacenamiento.

Las muestras obtenidas se envasan, identifican, transportan y almacenan, tomando en cuenta lo siguiente:

3.1.4.1.- Envase.

Las muestras se envasan en recipientes de volumen suficiente, perfectamente limpios y secos antes de ser llenados, que pueden ser de lámina, vidrio o plástico cuando se trate de emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados, y solamente de amina de boca ancha cuando se trate de cementos asfálticos. Durante el envase se han de tener las siguientes precauciones:

- Que las muestras no se contaminen con polvo u otras materias extrañas.
- Que los recipientes queden llenos cuando se trate de materiales asfálticos líquidos y en cualquier caso, perfectamente tapados con objeto de evitar pérdidas en su contenido.
- Que en ningún caso utilicen tapones de hule.

3.1.4.2.- Identificación

Las muestras se identifican mediante etiquetas que se fijan en los envases, en las cuales se anotan los siguientes datos claramente escritos:

- Remitente
- Tipo de material
- Procedencia del material
- Número de lote
- Tamaño del lote (expresado mediante el número de recipientes o depósitos que compone el lote y el volumen o masa promedio del material que contiene cada uno, o cuando se trate de un solo deposito, mediante el volumen del material que contiene)

- Fecha de fabricación o suministro del material
- Uso que se destina
- Obra
- Tipo de muestra (parcial o integral) y su número
- Lugar de muestreo
- Temperatura del producto al momento del muestreo, con una aproximación de más menos 1° C.
- Nivel a que se tomó la muestra
- Observaciones
- Fecha y hora del muestreo

Los datos indicados también se deben de anotar en una libreta de campo, así como todas las observaciones que se consideren necesarias.

3.1.4.3.-Transporte y almacenamiento

Para transportar las muestras correctamente envasadas, del sitio de su obtención al laboratorio encargado de su análisis, e acomodan en el vehículo de transporte de tal modo que no se golpeen o dañen. Una vez recibidas en el laboratorio, se registran asignándoles un número de identificación para su prueba y se almacenan perfectamente tapadas en lugares frescos que no estén sujetos a cambios bruscos de temperatura. En general no es conveniente conservar las muestras en el laboratorio durante más de un mes antes de ser ensayadas.

3.2 VISCOSIDAD DINÁMICA DE CEMENTOS Y RESIDUOS ASFÁLTICOS

3.2.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 60°C (140°F). Es aplicable a materiales asfálticos que tengan una viscosidad de 4,2 a 20 000 Pa·s (42 a 200 000 P).

La prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 20 ml del material por probar a través de un tubo capilar al vacío, bajo condiciones de presión y temperatura preestablecidas, corregido por el factor de calibración del viscosímetro.

3.2.2 Equipo y materiales

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

3.2.2.1 Viscosímetro

De tipo capilar, cilíndrico, hecho de vidrio de borosilicato templado. Puede ser de los siguientes tipos:

1) Viscosímetro capilar de vacío del Instituto del Asfalto (AIVV)

Como el mostrado en la Figura 3.2 y que cumpla con las características establecidas en la Tabla 3.4. Contará con bulbos de medición (B, C y D) localizados en el brazo (M) del viscosímetro, el cual es un capilar de vidrio perforado de precisión. Los bulbos serán segmentos capilares y estarán separados por marcas para cronometraje (F, G, H, I). Además el viscosímetro contará con un soporte que lo mantenga en posición vertical cuando se coloque en el baño.

Este soporte se puede conseguir comercialmente; sin embargo, es posible fabricar uno, taladrando dos orificios en un tapón N°11 de hule, de 22 y 8 mm respectivamente, con una distancia de centro a centro de los orificios de 25 mm. Se hace una ranura entre ambos orificios y también entre el orificio de 8 mm y la orilla del tapón. Cuando se coloca en un orificio de 51 mm (2") en la cubierta del baño, el tapón mantiene al viscosímetro en su lugar.

Figura 3. 2 . -Viscosímetro capilar de vacío del Instituto del Asfalto (AIVV)

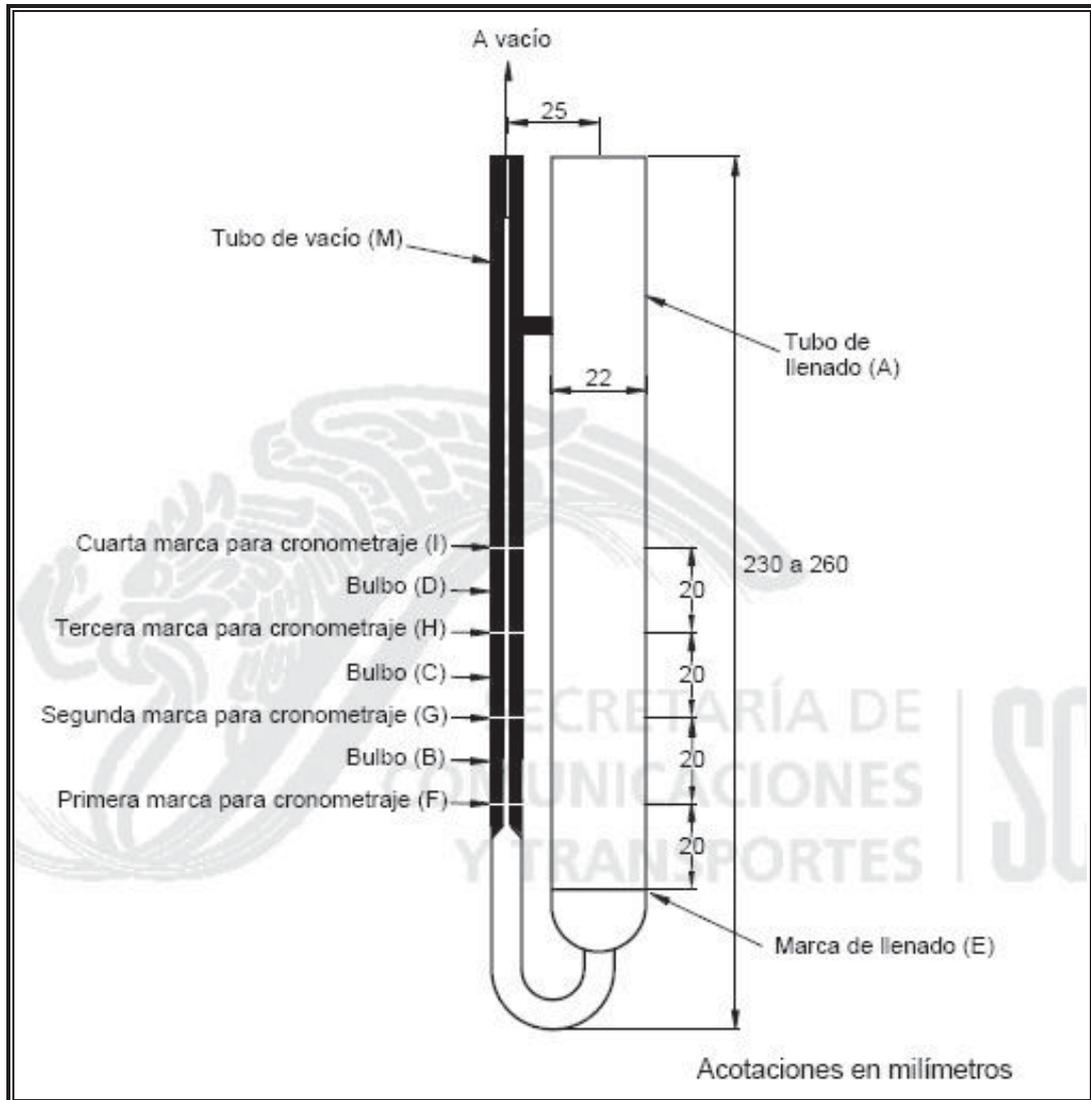


Tabla 3. 4 .- Tamaños de viscosímetros estándar, radio capilar, factores de calibración aproximados (K) y rangos de viscosidad para viscosímetros capilares de vacío del Instituto del Asfalto (AIVV)

Tamaño nominal	Radio capilar mm	Factor de calibración aproximado (K) ^[1] vacío de 300 mm Hg Pa (P/s)			Rango de viscosidad dinámica, η Pa·s (P) ^[2]
		Bulbo B	Bulbo C	Bulbo D	
25	0,125	0,2 (2)	0,1 (1)	0,07 (0,7)	4,2 a 80 (42 a 800)
50	0,25	0,8 (8)	0,4 (4)	0,3 (3)	18 a 320 (180 a 3 200)
100	0,50	3,2 (32)	1,6 (16)	1 (10)	60 a 1 280 (600 a 12 800)
200	1,0	12,8 (128)	6,4 (64)	4 (40)	240 a 5 200 (2 400 a 52 000)
400	2,0	50 (500)	25 (250)	16 (160)	960 a 20 000 (9 600 a 200 000)
400R ^[3]	2,0	50 (500)	25 (250)	16 (160)	960 a 14000 (9 600 a 140 000)
800R ^[3]	4,0	200 (2 000)	100 (1 000)	64 (640)	3 800 a 580 000 (38 000 a 5 800 000)

[1] Los factores de calibración exactos se obtendrán con viscosidad estándar.

[2] Los rangos de viscosidad corresponden a tiempos de llenado de 60 y 400 s. En ocasiones especiales se pueden utilizar tiempos de flujo mayores, incluso superiores a 1 000 s.

[3] En estos casos se tienen marcas adicionales a 5 y 10 mm arriba de la marca para cronometraje F (ver Figura 3.2), para diseños especiales de asfaltos en cubiertas. Así, el rango de viscosidad máxima medible se incrementa respecto a aquel que utiliza al factor de calibración del bulbo B.

2) Viscosímetro de vacío Koppers modificado (MKVV)

Como el mostrado en la Figura 3.3 y que cumpla con las características establecidas en la Tabla 3.5. Consistirá en un tubo de llenado (A) y un tubo de vidrio perforado capilar de vacío de precisión (M), unidos por una junta de borosilicato (N), con un filo estándar 24/40. Los bulbos de medición (B, C, y D), serán segmentos capilares de 20 mm de longitud, separados por marcas para cronometraje (F, G, H, I). Además contará con un soporte que lo mantenga en posición vertical cuando se coloque en el baño. Este soporte se puede conseguir comercialmente, sin embargo es posible fabricar uno, taladrando un orificio de 28 mm en el centro de un tapón N°11 de hule y cortando al tapón entre el orificio y la orilla. Cuando se coloca en un orificio de 51 mm (2") en la cubierta del baño, el tapón mantiene al viscosímetro en su lugar.

Figura 3. 3 .- Viscosímetro capilar de vacío Koppers modificado (MKVV)

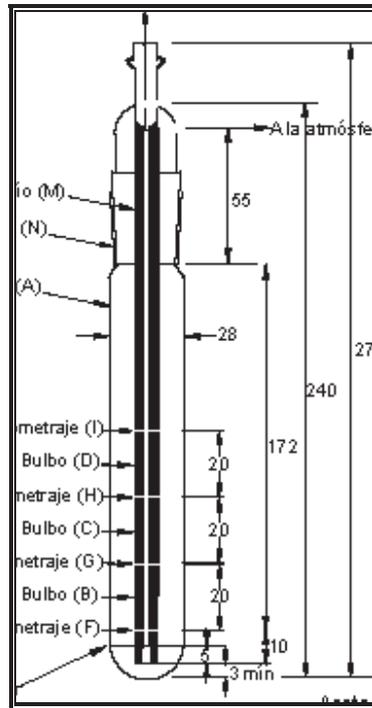


Tabla 3. 5 .- Tamaños de viscosímetros estándar, radio capilar, factores de calibración aproximados (K), y rangos de viscosidad para viscosímetros capilares de vacío Koppers modificados (MKVV)

Tamaño nominal	Radio capilar mm	Factor de calibración aproximado (K). ^[1] vacío de 300 mm Hg			Rango de viscosidad dinámica, η ^[2] Pa·s (P)
		Pa (P/s)			
		Bulbo B	Bulbo C	Bulbo D	
25	0,125	0,2 (2)	0,1 (1)	0,07 (0,7)	4,2 a 80 (42 a 800)
50	0,25	0,8 (8)	0,4 (4)	0,3 (3)	18 a 320 (180 a 3 200)
100	0,50	3,2 (32)	1,6 (16)	1 (10)	60 a 1 280 (600 a 12 800)
200	1,0	12,8 (128)	6,4 (64)	4 (40)	240 a 5 200 (2 400 a 52 000)
400	2,0	50 (500)	25 (250)	16 (160)	960 a 20 000 (9 600 a 200 000)

[1] Los factores de calibración exactos se obtendrán con viscosidad estándar.

[2] Los rangos de viscosidad corresponden a tiempos de llenado de 60 y 400 s. En ocasiones especiales se pueden utilizar tiempos de flujo mayores, incluso superiores a 1 000 s.

3.2.2.2 Termómetros

De inmersión total, con escala que abarque de 0 a 150°C y aproximación de 0,2°C.

3.2.2.3 Baño

- Con las dimensiones adecuadas para que la marca para cronometraje superior de los viscosímetros, pueda ubicarse por lo menos a 20 mm por debajo de la superficie del líquido del baño.
- Que permita observar en todo momento tanto el viscosímetro como el termómetro.
- Que forme parte integral del viscosímetro o que cuente con un soporte firme para este último.

3.2.2.4 Sistema de vacío

- Que tenga un sistema general como el que se muestra esquemáticamente en la Figura 3.4.
- Capaz de mantener un nivel de vacío de hasta 300 mm Hg con aproximación de $\pm 0,5$.mm.Hg.
- A base de tubos de vidrio con un diámetro interior de 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ "), con juntas herméticas entre los tubos que garanticen que no se pierda el vacío.
- Que cuente con un manómetro de mercurio con un extremo abierto, con aproximación de 1.mm Hg y una bomba de vacío.

3.2.2.5 Cronómetros

Dos cronómetros, con aproximación de 0,1 s y precisión de $\pm 0,05\%$.

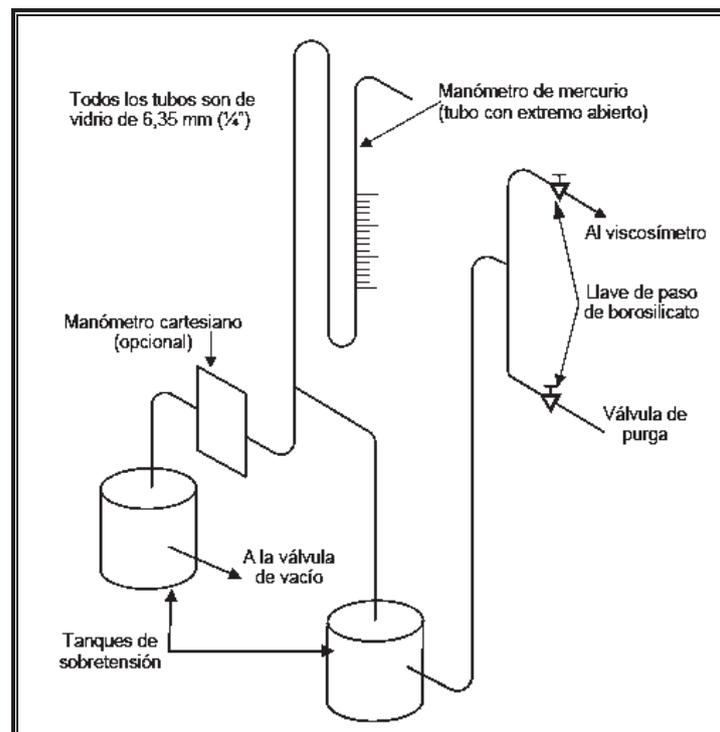
3.2.2.6 Líquido para llenar el baño

Agua destilada.

3.2.3 preparación de la muestra

La muestra de prueba, según se trate de cemento asfáltico, del residuo de la prueba de película delgada o del residuo asfáltico obtenido por destilación de una emulsión o de un asfalto rebajado, se prepara como se indica a continuación:

Figura 3. 4 .- Sistema de vacío sugerido para viscosímetros capilares de vacío



3.2.3.1 Muestra de cemento asfáltico

- Se calienta la muestra en un recipiente apropiado, agitándola ocasionalmente para evitar el sobrecalentamiento local y distribuir el calor uniformemente, hasta que adquiera la fluidez suficiente que facilite su vaciado.
- Se vacían 20 ml de la muestra en un contenedor adecuado y se calienta hasta alcanzar una temperatura de $135 \pm 5,5^{\circ}\text{C}$ ($275 \pm 10^{\circ}\text{F}$), agitándola ocasionalmente para evitar el sobrecalentamiento local, distribuir el calor uniformemente y evitar que quede aire atrapado.

3.2.4 Determinación de la viscosidad dinámica

3.2.4.1 Calibración del equipo

1) Calibración del viscosímetro de vacío por medio de viscosidad estándar

- a) Se calibrará mediante un aceite de viscosidad estándar cuando en la muestra de prueba se esperen las viscosidades dinámicas aproximadas señaladas en la Tabla 3.6.

Tabla 3. 6 .- Viscosidades estándar de aceites utilizados para la calibración de los viscosímetros

Viscosidad estándar	Viscosidad dinámica aproximada, η	
	Pa·s (P)	
	A 20°C (68°F)	A 38°C (100°F)
N 30 000	150 (1 500)	24 (240)
N 190 000	800 (8000)	160 (1600)
S 30 000	---	24 (240)

- b) Se selecciona de la Tabla 3.6, un aceite de viscosidad estándar que tenga un tiempo mínimo de flujo de 60 s a la temperatura de calibración.
- c) Se carga un viscosímetro limpio y seco con el aceite estándar hasta ± 2 mm de la línea de llenado E.
- d) Se coloca el viscosímetro cargado en el baño, manteniendo la temperatura de calibración con aproximación de $\pm 0,01^\circ\text{C}$ ($\pm 0,02^\circ\text{F}$).
- e) Se establece un vacío de $300 \pm 0,5$ mm de Hg en el sistema de vacío y se conecta éste al viscosímetro con la llave de paso cerrada en la línea que va a este último.
- f) Después de que el viscosímetro ha estado en el baño por 30 ± 5 min., se inicia el flujo del aceite estándar abriendo la llave de paso en la línea que va al sistema de vacío.
- g) Se mide el tiempo requerido para que la orilla principal del menisco, es

decir, la parte superior visible del mismo, pase entre las marcas F y G, con aproximación de 0,1 s. Utilizando otro cronómetro, se mide el tiempo requerido para que la orilla principal del menisco pase entre las marcas para cronometraje G y H, con aproximación de 1 s. Si el instrumento contiene marcas para cronometraje adicionales, se determina de la misma manera el tiempo de flujo para cada bulbo sucesivo.

h) Se calcula el factor de calibración K, para cada bulbo como sigue:

$$K = \frac{\eta_e}{t}$$

Donde:

K = Factor de calibración del bulbo (a 300 mm Hg), (Pa)

η_e = Viscosidad dinámica del aceite de viscosidad estándar a la temperatura de calibración, (Pa·s)

t = Tiempo de flujo, (s)

i) Se repite el procedimiento de calibración utilizando la misma viscosidad estándar u otra viscosidad estándar distinta.

j) Se calcula y registra el promedio del factor de calibración K para cada bulbo. Los resultados obtenidos en las dos determinaciones no deben variar más del 2% respecto a su promedio, en caso contrario se repetirá el procedimiento hasta que esto se cumpla.

k) Es importante hacer notar que los factores de calibración del bulbo son independientes de la temperatura.

2) Calibración del viscosímetro de vacío por medio del viscosímetro de vacío estándar

a) Se elige cualquier material asfáltico que tenga un tiempo de flujo de al menos 60 s y se selecciona un viscosímetro estándar con factores de calibración de bulbo (K) conocidos.

b) Se monta el viscosímetro estándar junto con el viscosímetro que va a ser

calibrado en el mismo baño a 60°C (140°F) y se determinan los tiempos de flujo del material asfáltico.

- c) Se calcula el factor de calibración K_1 para cada bulbo, como sigue:

$$K_1 = \frac{K_2 \times t_2}{t_1}$$

Donde:

- K_1 = Factor de calibración del bulbo del viscosímetro que se está calibrando, (Pa)
 K_2 = Factor de calibración del bulbo del viscosímetro estándar, (Pa)
 t_1 = Tiempo de flujo del bulbo del viscosímetro que se está calibrando, (s)
 t_2 = Tiempo de flujo del bulbo del viscosímetro estándar, (s)

3.2.5 Procedimiento de la prueba

El procedimiento de prueba varía ligeramente según el tipo de viscosímetro que se utilice, por lo que, además de lo indicado a continuación, es necesario considerar las características particulares de los viscosímetros señaladas con anterioridad.

- 1) Se mantiene el baño a $60 \pm 0,01^\circ\text{C}$ ($140 \pm 0,02^\circ\text{F}$), aplicando, en su caso, las correcciones necesarias en todas las lecturas del termómetro.
- 2) Se selecciona un viscosímetro limpio y seco, que dé un tiempo de flujo mayor de 60 s y se precalienta a $135 \pm 5,5^\circ\text{C}$ ($275 \pm 10^\circ\text{F}$).
- 3) Se carga el viscosímetro vertiendo la muestra preparada a ± 2 mm de la línea de llenado E.
- 4) Se coloca el viscosímetro cargado en un horno o un baño, mantenidos a $135 \pm 5,5^\circ\text{C}$ ($275 \pm 10^\circ\text{F}$) por un período de 10 ± 2 min., para eliminar la mayor parte de las burbujas de aire atrapadas.
- 5) Se retira el viscosímetro del horno o del baño y, en un tiempo no mayor de 5 min., se inserta el viscosímetro en un soporte y se coloca verticalmente en el baño, de tal manera que la marca para cronometraje superior, esté al menos 20 mm por debajo

de la superficie del líquido del baño.

- 6) Se establece un vacío de $300 \pm 0,5$ mm Hg en el sistema de vacío y se conecta éste al viscosímetro con la llave de paso cerrada.
- 7) Después de que el viscosímetro ha estado en el baño por 30 ± 5 min., se inicia el flujo del material asfáltico abriendo la llave de paso en la línea que va al sistema de vacío.
- 8) Se mide el tiempo requerido para que la orilla principal del menisco pase entre dos marcas para cronometraje sucesivas, que es el tiempo de flujo. Se reporta el primer tiempo de flujo que sea mayor de 60 s entre dos marcas para cronometraje sucesivas, registrando la letra de identificación de estas últimas.
- 9) Una vez completada la prueba, se deja drenar el viscosímetro para después limpiarlo perfectamente enjuagándolo varias veces con un solvente apropiado completamente miscible con la muestra, seguido por un solvente totalmente volátil. Posteriormente se seca el viscosímetro pasando por él una corriente lenta de aire seco filtrado durante 2 min., o hasta que la última marca de solvente desaparezca.

3.2.6 Cálculos y resultados

- Se selecciona el factor de calibración (**K**) que corresponda al par de marcas para cronometraje utilizadas para la determinación del tiempo de flujo. Se calcula la viscosidad mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = K \times t$$

Donde:

- η = Viscosidad dinámica, (Pa·s)
- K** = Factor de calibración seleccionado, (Pa)
- t = Tiempo de flujo, (s)

- La viscosidad dinámica se reportará con una aproximación al milésimo, anotando además, la temperatura de prueba y la presión de vacío utilizada.

3.2.7 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

1. Sumergir los termómetros de tal forma que sólo la columna de mercurio este cubierta por el agua y el resto del tallo y la cámara de expansión estén expuestos a la temperatura del laboratorio y a la presión ambiental, ya que en caso contrario podrían obtenerse mediciones inexactas y tendrían que hacerse correcciones.
2. Verificar que el viscosímetro esté calibrado de acuerdo con lo establecido en esta prueba.
3. Limpiar periódicamente el viscosímetro con una solución limpiadora de ácido crómico para remover depósitos orgánicos, enjuagándolo completamente con agua destilada y acetona, y secándolo con aire seco y limpio. Se puede preparar solución limpiadora de ácido crómico, adicionando con las precauciones normales, 800 mL de ácido sulfúrico concentrado a una solución de 92 g de bicromato de sodio en 458 mL de agua. Es aceptable el uso de soluciones limpiadoras de ácido sulfúrico comercial similar. El uso de soluciones limpiadoras alcalinas puede producir un cambio en la calibración del viscosímetro, por lo que no son recomendables.
4. Cuidar que la variación de temperatura en la muestra durante las calibraciones y las pruebas, esté dentro de la tolerancia indicada.

3.3 VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE CEMENTOS ASFÁLTICOS

3.3.2 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 135°C (275°F). Es aplicable a cementos asfálticos que tengan una viscosidad de 30 a 100 000 mm²/s (30 a 100 000 cSt).

La prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 20 mL del material por probar a través de un tubo capilar, bajo condiciones de temperatura preestablecidas, y multiplicar dicho tiempo por el factor de calibración del viscosímetro.

3.3.3 Equipo y materiales

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

3.3.3.1 Viscosímetro

De flujo inverso, tipo Zeitfuchs Cross-Arm, capilar, cilíndrico, hecho de vidrio de borosilicato templado, como el mostrado en la Figura 3.5 y que cumpla con las características establecidas en la Tabla 3.8.

Tabla 3. 7 .- Tamaños nominales, factores de calibración aproximados (C), rangos de viscosidad y dimensiones para viscosímetros capilares de flujo inverso Zeitfuchs Cross-Arm

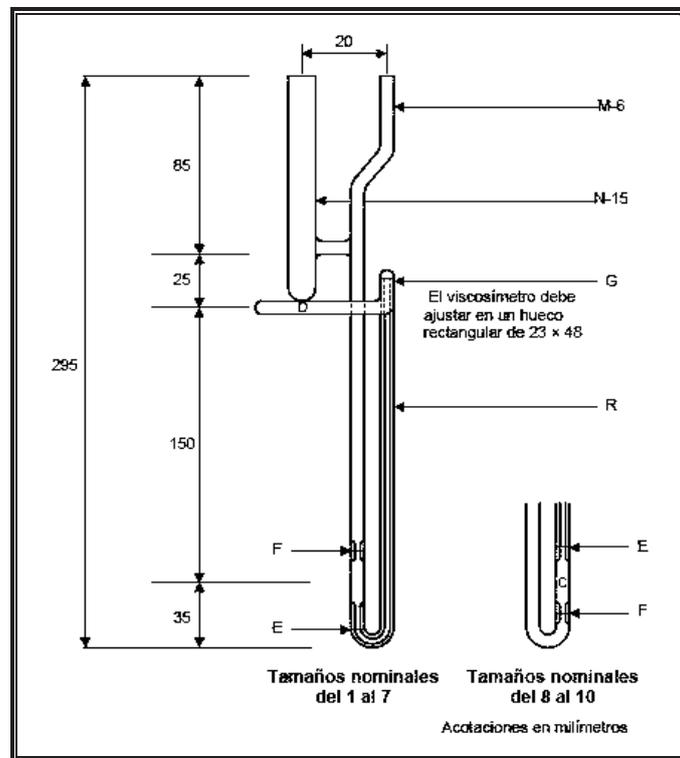
Tamaño nominal	Factor de calibración aproximado (C) mm^2/s	Rango de viscosidad mm^2/s	Diámetro interior del tubo R ^[1] mm	Longitud del tubo R ^[2] mm	Volumen del bulbo inferior ^[3] mL	Diámetro del tubo horizontal ^[3] mm
1	0,003	0,6 a 3	0,27	210	0,3	3,9
2	0,01	2 a 10	0,35	210	0,3	3,9
3	0,03	6 a 30	0,46	210	0,3	3,9
4	0,1	20 a 100	0,64	210	0,3	3,9
5	0,3	60 a 300	0,84	210	0,3	3,9
6	1,0	200 a 1 000	1,15	210	0,3	4,3
7	3,0	600 a 3 000	1,42	210	0,3	4,3
8	10,0	2 000 a 10 000	1,93	165	0,25	4,3
9	30,0	6 000 a 30 000	2,52	165	0,25	4,3
10	100,0	20 000 a 100 000	3,06	165	0,25	4,3

[1] Ver Figura 3.5. Tolerancia de $\pm 2\%$.

[2] Ver Figura 3.5.

[3] Tolerancia de $\pm 5\%$.

Figura 3.5.- Viscosímetro Zeitfuchs Cross-Arm



3.3.3.2 Termómetros

De inmersión total, con escala que abarque de 0 a 150°C y aproximación de 0,2°C.

3.3.3.3 Baño

- Con las dimensiones adecuadas para que la marca para cronometraje superior del viscosímetro, pueda ubicarse por lo menos a 20 mm por debajo de la superficie del líquido del baño.
- Que permita observar en todo momento tanto el viscosímetro como el termómetro.
- Que forme parte integral del viscosímetro o que cuente con un soporte firme para este último.

3.3.3.4 Cronómetro

Con aproximación de 0,1 s y precisión de $\pm 0,05\%$.

3.3.3.5 Líquido para llenar el baño

Aceite mineral, para determinaciones de la viscosidad a 135°C . Se puede utilizar agua destilada en el caso de que se deseen realizar determinaciones a 60°C .

3.3.3.6 Barómetro

Para medir la presión barométrica en el sitio donde se realice la prueba.

3.3.4 Preparación de la muestra

La preparación de la muestra de cemento asfáltico obtenida, se hace de la siguiente manera:

- 1) Se calienta la muestra en un recipiente apropiado, agitándola ocasionalmente para evitar el sobrecalentamiento local y distribuir el calor uniformemente, hasta que adquiera la fluidez suficiente que facilite su vaciado.
- 2) Se vacían 20 mL de la muestra en un contenedor adecuado y se calienta hasta alcanzar una temperatura de $135 \pm 5,5^{\circ}\text{C}$ ($275 \pm 10^{\circ}\text{F}$), agitándola ocasionalmente para evitar el sobrecalentamiento local, distribuir el calor uniformemente y evitar que quede aire atrapado.

3.3.5 Determinación de la viscosidad cinemática

3.3.5.1 Calibración del viscosímetro por medio de viscosidad estándar

- 1) Se selecciona de la Tabla 3.8, un aceite de viscosidad estándar que tenga un tiempo mínimo de flujo de 20 s a $37,8^{\circ}\text{C}$ y se mide el tiempo de flujo con aproximación de 0,1 s, de acuerdo con el procedimiento descrito en pasos anteriores.

Tabla 3. 8 Viscosidades estándar de aceites utilizados para la calibración de los viscosímetros

Viscosidad estándar	Viscosidad cinemática aproximada, a 38,7°C (100°F) mm ² /s
S 60	60
S 200	200
S 600	600
S 2 000	2 000
S 8 000	8 000
S 30 000	27 000

2) Se calcula el factor de calibración C, como sigue:

$$C = \frac{v}{t}$$

Donde:

C = Factor de calibración, mm²/s²

v = Viscosidad cinemática del aceite de viscosidad estándar a 37,8°C, mm²/s

3) Si el viscosímetro es usado en un lugar distinto al laboratorio de calibración, el factor de calibración C, será corregido por la diferencia entre la aceleración de la gravedad de los dos lugares, utilizando la expresión que se indica a continuación. Fallas en la corrección de la gravedad pueden provocar errores del 0,2% o mayores.

$$C_2 = \left(\frac{g_2}{g_1} \right) \times C_1$$

Donde:

C₂ = Factor de calibración en el laboratorio de prueba, mm²/s²

C₁ = Factor de calibración en el laboratorio de calibración, mm²/s²

g_2 = Aceleración de la gravedad en el laboratorio de prueba, m/s^2

g_1 = Aceleración de la gravedad en el laboratorio de calibración, m/s^2

- 4) Los certificados de calibración de los viscosímetros deben especificar el valor de g_1 .

3.3.5.2 Procedimiento de la prueba

- 1) Se mantiene el baño a $135 \pm 0,03^\circ C$ ($140 \pm 0,02^\circ F$), aplicando, en su caso, las correcciones necesarias en todas las lecturas del termómetro.
- 2) Se selecciona un viscosímetro limpio y seco, que dé un tiempo de flujo mayor de 60 s y se precalienta a $135 \pm 5,5^\circ C$ ($275 \pm 10^\circ F$).
- 3) Se monta el viscosímetro en el baño manteniendo vertical el tubo N y se carga vertiendo la muestra preparada a través de dicho tubo dentro del tubo D, hasta que el nivel de la muestra esté a una distancia no mayor de 0,5 mm de la línea de llenado G en el tubo de sifón, cuidando que no se humedezcan las paredes del tubo N durante el vertido. La muestra debe estar libre de pelusa, partículas sólidas u otras materias ajenas.
- 4) Se deja el viscosímetro en el baño hasta que la muestra haya alcanzado la temperatura de prueba de $135 \pm 0,03^\circ C$ ($140 \pm 0,02^\circ F$), pero no más de 30 min.
- 5) Se aplica una ligera succión al tubo N para hacer que el menisco de la muestra de prueba se mueva hacia el tubo de sifón, hasta aproximadamente 30 mm abajo del nivel del tubo D en el tubo capilar R, con lo que se provoca el flujo de la muestra por gravedad.
- 6) Se mide el tiempo requerido para que la orilla principal del menisco pase de la marca E a la F, con aproximación de 0,1 s. Si este tiempo de flujo es menor de 60 s, se selecciona un viscosímetro con un diámetro capilar menor y se repite el procedimiento de prueba indicado en esta Fracción.

3.3.6 Cálculos y resultados

- Se calcula la viscosidad cinemática mediante la siguiente ecuación:

$$v = C \times t$$

Donde:

ν = Viscosidad cinemática, mm^2/s

C = Factor de calibración del viscosímetro, mm^2/s^2

t = Tiempo de flujo, s

- La viscosidad cinemática se reportará con una aproximación al milésimo, anotando además, la temperatura de prueba.

3.3.7 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

1. Sumergir los termómetros de tal forma que sólo la columna de mercurio este cubierta por el líquido del baño y el resto del tallo y la cámara de expansión estén expuestos a la temperatura del laboratorio y a la presión ambiental, ya que en caso contrario podrían obtenerse mediciones inexactas y tendrían que hacerse correcciones.
2. Verificar que el viscosímetro esté calibrado de acuerdo con lo establecido con anterioridad.
3. Limpiar periódicamente el viscosímetro con una solución limpiadora de ácido crómico para remover depósitos orgánicos, enjuagándolo completamente con agua destilada y acetona, y secándolo con aire seco y limpio. Se puede preparar solución limpiadora de ácido crómico, adicionando con las precauciones normales, 800 mL de ácido sulfúrico concentrado a una solución de 92 g de bicromato de sodio en 458 mL de agua destilada. Es aceptable el uso de soluciones limpiadoras de ácido sulfúrico comercial similar. El uso de soluciones limpiadoras alcalinas puede producir un cambio en la calibración del viscosímetro, por lo que no son recomendables.
4. Cuidar que la variación de temperatura en la muestra durante las calibraciones y las pruebas, esté dentro de la tolerancia indicada.

3.4 VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL EN MATERIALES ASFÁLTICOS

3.4.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite conocer la consistencia de los materiales asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 135°C para los cementos, de 25 y 50°C para las emulsiones y de 50 y 60°C para los asfaltos rebajados, pudiéndose hacer a otras temperaturas, con el propósito de estudiar la susceptibilidad al calor de los materiales asfálticos y determinar las viscosidades apropiadas para su utilización. La prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 60 cm³ del material a probar a través de un orificio Furol, instalado en un tubo de viscosidad Saybolt, bajo condiciones de carga y temperatura preestablecidas.

3.4.2 Equipo y materiales

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

3.4.2.1 Viscosímetro Saybolt - Furol

Integrado por:

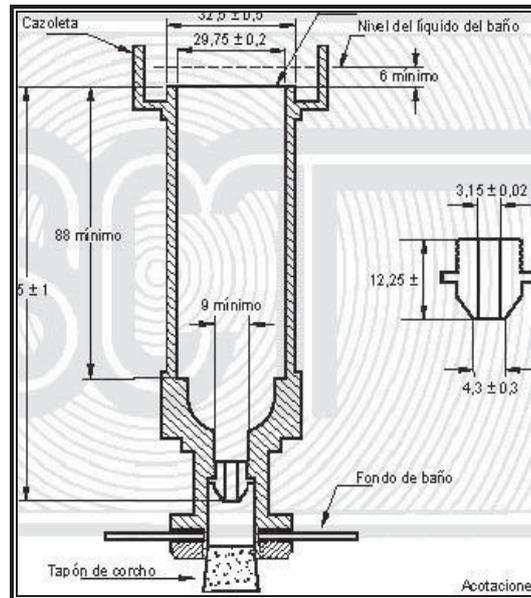
- Un tubo de viscosidad Saybolt y boquilla con orificio Furol, ambos de metal resistente a la corrosión, con la forma y dimensiones indicadas en la Figura 3.6.

El tubo estará provisto con una tuerca en su parte inferior para fijarlo en posición vertical en el recipiente del baño y con un tapón de corcho u otro dispositivo similar que impida el flujo del material asfáltico, que tenga un cordón o cadena para facilitar su remoción.

- Una tapa metálica para el tubo de viscosidad, que consiste en una placa circular biselada, con diámetro inferior de aproximadamente 56 mm y 7 mm de espesor, con un orificio en el centro con diámetro ligeramente mayor que el del termómetro.
- Un baño de aceite, acondicionado para mantener el nivel del líquido en su interior 6 mm arriba del borde de derrame del tubo de viscosidad, y adaptado para sujetar dicho tubo en posición vertical. Estará equipado con un agitador, un sistema de control de

temperatura con capacidad hasta de 235°C con aproximación de 0,2°C y una fuente de calor alejada por lo menos 3 cm del tubo de viscosidad.

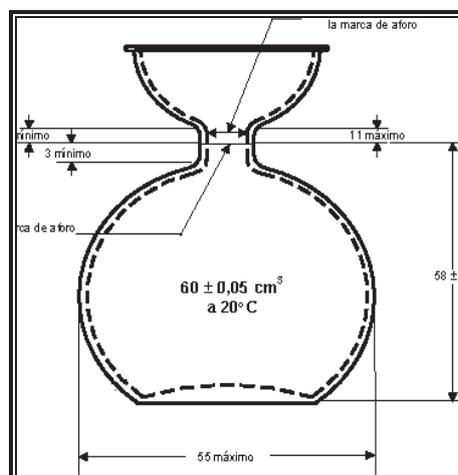
Figura 3. 6 .- Tubo de viscosidad Saybolt y boquilla con orificio Furol



3.4.2.2 Matraz de vidrio

De la forma y dimensiones indicadas en la Figura 3.7, con capacidad de $60 \pm 0,05 \text{ cm}^3$, aforado a la temperatura de 20°C, con la marca de aforo en el cuello.

Figura 3. 7 .-Matraz aforado



3.4.2.3 Equipo para filtrado

Se requiere de un embudo de la forma y dimensiones indicadas en la Figura 3.8, de metal resistente a la corrosión y provisto de una malla N° 20 (850 μm de abertura) cuando se prueben cementos asfálticos o N° 100 (150 μm de abertura) para asfaltos rebajados, fijada al embudo mediante un sujetador. Cuando se trate de emulsiones asfálticas, únicamente se requiere una malla N° 20 (850 μm de abertura) o tela de alambre con la misma abertura, montada en un marco.

3.4.2.4 Termómetros

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

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

3.4.2.5 Parrilla eléctrica

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

3.4.2.6 Cronómetro

Con aproximación de 1 s.

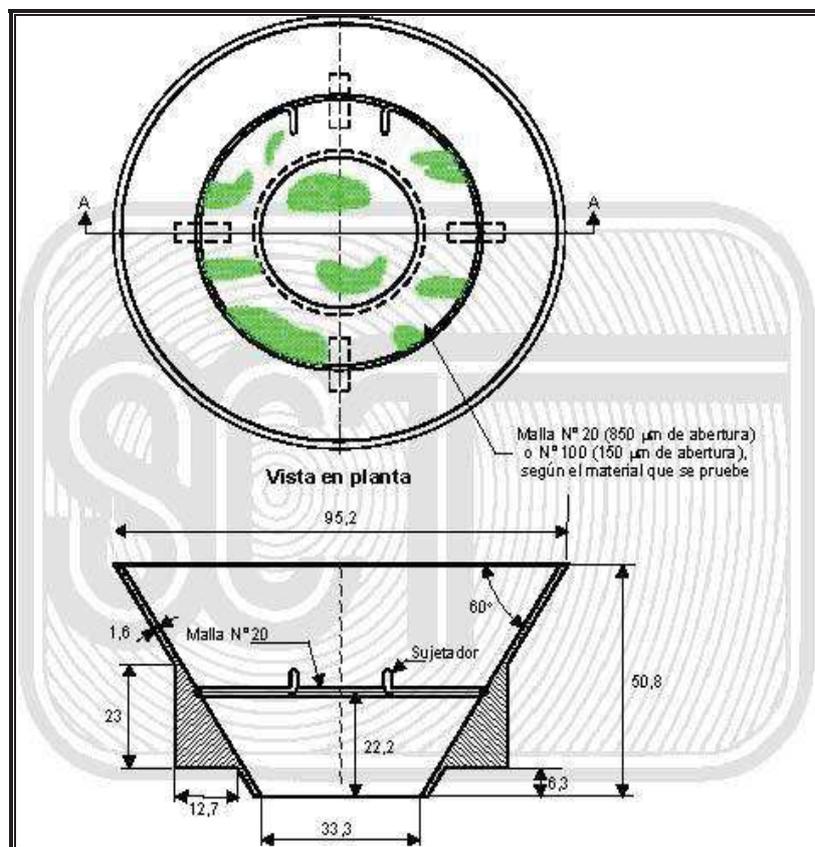
3.4.2.7 Vaso de precipitado

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

3.4.2.8 Líquido para llenar el baño

Cuando se efectúen pruebas en cementos asfálticos a temperatura entre 120 y 150°C, el líquido para llenar el baño será aceite de grado 40 (SAE) o, si las temperaturas son superiores, aceite con viscosidad Saybolt-Furol de 17,5 a 18,5 s, a 99°C y punto de inflamación en copa abierta de Cleveland 357°C. Cuando se prueben emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados, el baño se llenará con agua en lugar de aceite.

Figura 3. 8.- Embudo para filtrado



3.4.3 Preparación de la muestra

La preparación de la muestra de material asfáltico, se hace de la siguiente manera:

3.4.3.1 De cementos asfálticos

Se colocan 450 g de la muestra de cemento asfáltico en un recipiente y para fluidificarla se calienta hasta alcanzar una temperatura superior en 15°C a la de prueba, agitándola de vez en cuando, excepto durante los últimos 30°C de calentamiento, cuando el agitado será continuo. El tiempo de calentamiento no será mayor de 2 h y la muestra solamente se debe calentar una vez.

3.4.3.2 De emulsiones asfálticas

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

3.4.3.3 De asfaltos rebajados

Se colocan 150 g de la muestra de asfalto rebajado en un recipiente y se calienta hasta alcanzar una temperatura superior en 2°C a la de prueba, agitándola continuamente para uniformar la temperatura y evitar sobrecalentamientos locales.

3.4.4 Procedimiento de la prueba

3.4.4.1 En cementos asfálticos o asfaltos rebajados

Para realizar la prueba en cementos asfálticos o asfaltos rebajados, se procede de la siguiente manera:

- 1) Se llena el baño del viscosímetro con el aceite adecuado para la temperatura a la cual se efectuará la prueba o con agua si se trata de un asfalto rebajado.
- 2) Se limpia el tubo de viscosidad con xilol o petróleo diáfano y se seca perfectamente antes de utilizarlo. Para facilitar esta limpieza, después de cada prueba el tubo de viscosidad se llena con aceite, se vacía y enseguida se limpia con xilol.
- 3) Una vez limpiado el tubo de viscosidad, se le inserta el tapón de corcho en su parte inferior, de manera que penetre de 6 a 9 mm, cuidando que ajuste herméticamente para

evitar pérdidas de la muestra de prueba.

- 4) Se ajusta el baño del viscosímetro a una temperatura ligeramente inferior a la seleccionada para la prueba; se entibian y secan el tubo de viscosidad y el embudo con la malla N° 20 cuando se trate de cemento asfáltico o N° 100 para asfalto rebajado. A continuación se vierte en el tubo de viscosidad la muestra preparada, filtrándola a través de la malla, hasta que se derrame en la cazoleta; se coloca la tapa y se inserta el termómetro a través del orificio central de la misma.
- 5) Se agita la muestra continuamente con el termómetro, dándole a éste un movimiento circular y evitando movimientos verticales que pudieran provocar la formación de burbujas, teniendo cuidado de no golpear el fondo del tubo de viscosidad para no presionar el asfalto a través del orificio de la boquilla; se ajusta la temperatura del baño hasta que la muestra alcance la temperatura de prueba y se establezca el equilibrio térmico.
- 6) Cuando la temperatura de la muestra permanezca constante durante 1 min. de agitado continuo, con una discrepancia no mayor de $0,3^{\circ}\text{C}$ respecto a la temperatura de prueba, se retirara la tapa para verificar que la muestra dentro de la cazoleta no llegue al nivel de derrame y se vuelve a colocar la tapa.
- 7) Inmediatamente después se coloca el matraz debajo del tubo de viscosidad, se retira el tapón de corcho y simultáneamente se pone en marcha el cronómetro, el cual se detiene en el momento en que la muestra alcance la marca de aforo de 60 cm^3 del matraz y se registra el tiempo medido. El tiempo transcurrido desde que se inicia el llenado del tubo de viscosidad hasta que empieza el llenado del matraz no debe ser mayor de 15 min.

3.4.4.2 En emulsiones asfálticas

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

- 1) Se llena el baño del viscosímetro con agua.
- 2) Se limpia el tubo de viscosidad con xilol o petróleo diáfano y se seca perfectamente antes de utilizarlo. Para facilitar esta limpieza, después de cada prueba el tubo de viscosidad se llena con aceite, se vacía y enseguida se limpia con xilol.

- 3) Una vez limpiado el tubo de viscosidad, se le inserta el tapón de corcho en su parte inferior, de manera que penetre de 6 a 9 mm, cuidando que ajuste herméticamente para evitar pérdidas de la muestra de prueba.
- 4) Dependiendo de la temperatura a la que se realice la prueba, se calienta el baño del viscosímetro y la muestra de la emulsión asfáltica como se indica a continuación:

a) Para prueba a 25°C

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

b) Para prueba a 50°C

Se ajusta el baño a una temperatura de $60 \pm 3^\circ\text{C}$. A continuación se coloca en éste, el vaso de precipitado que contiene la muestra de emulsión asfáltica de manera que su fondo quede abajo del nivel del agua aproximadamente 5 cm y se agita periódicamente su contenido, con movimientos circulares del termómetro a razón de aproximadamente 60 revoluciones por minuto, evitando la formación de burbujas. En las condiciones mencionadas se mantiene la muestra hasta que alcance una temperatura de $51,4 \pm 0,3^\circ\text{C}$ y se procede como se indica en el inciso siguiente.

- 5) Se vierte en el tubo de viscosidad la muestra de emulsión asfáltica calentada, filtrándola a través de la malla N° 20 o la tela de alambre, previamente entibiada y seca, hasta que la emulsión asfáltica se derrame en la cazoleta; se coloca la tapa y se inserta el termómetro a través del orificio central de la misma.
- 6) Se agita la muestra continuamente con el termómetro, dándole a éste un movimiento circular y evitando movimientos verticales que pudieran provocar la formación de

burbujas, teniendo cuidado de no golpear el fondo del tubo de viscosidad para no presionar la emulsión a través del orificio de la boquilla; se ajusta la temperatura del baño hasta que la muestra alcance la temperatura de prueba y se establezca el equilibrio térmico.

- 7) Cuando la temperatura de la muestra permanezca constante durante 1 min. de agitado continuo, con una discrepancia no mayor de $0,1^{\circ}\text{C}$ respecto a la temperatura de prueba, se retira la tapa para verificar que la muestra dentro de la cazoleta no llegue al nivel de derrame y se vuelve a colocar la tapa.
- 8) Inmediatamente después se coloca el matraz debajo del tubo de viscosidad, se retira el tapón de corcho y simultáneamente se pone en marcha el cronómetro, el cual se detiene en el momento en que la muestra alcance la marca de aforo de 60 cm^3 del matraz y se registra el tiempo medido. El lapso desde que se inicia el llenado del tubo de viscosidad hasta que empiece el llenado del matraz no debe ser mayor de 15 min.

3.4.5 Cálculos y resultados

Se reporta como viscosidad Saybolt-Furol de la muestra, el tiempo en segundos que tarda en llenarse el matraz con el material asfáltico hasta la marca de aforo, indicando también la temperatura de prueba.

3.4.6 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

1. Realizar la prueba en lugares en que no se produzcan corrientes de aire ni cambios bruscos de temperatura.
2. Que durante el llenado del matraz, el asfalto escurra por la pared de su cuello, para evitar la formación de espuma o burbujas de aire.
3. Que las paredes interiores del baño y del tubo de viscosidad no tengan carbón u otras impurezas, verificándolo periódicamente.

3.5 VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD DE CEMENTOS ASFÁLTICOS

3.5.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, en un rango de 38 a 260°C, mediante la determinación de la resistencia que ofrece una muestra de prueba a la deformación. La prueba consiste en determinar el par de torsión que es necesario aplicar en un eje rotacional, en el seno de una muestra de prueba colocada dentro de un contenedor, bajo condiciones controladas de temperatura, para que gire a una cierta velocidad.

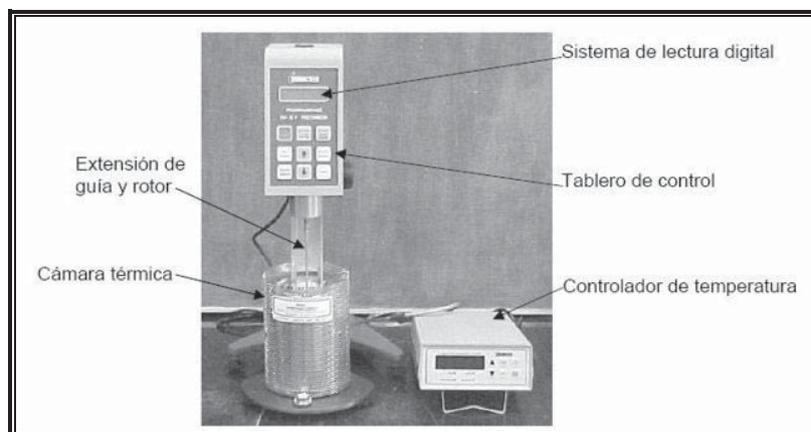
3.5.2 Equipo

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

El equipo Brookfield Thermosel es como el mostrado en la Figura 3.9 y cuenta con:

- 1) Viscosímetro Brookfield estándar. Dependiendo del rango de viscosidad, puede ser modelo tipo LV, RV, HA o HB, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.
- 2) Sistema de lectura digital.
- 3) Extensión de guía y rotor.
- 4) Sistema Thermosel formado por un contenedor y una cámara de prueba térmica; un controlador de temperatura y un dispositivo gráfico.

Figura 3.9 .- Viscosímetro digital Brookfield



3.5.3 Preparación del equipo

- 1) Previamente a la realización de la prueba, el equipo estará debidamente calibrado, considerando las instrucciones del fabricante.
- 2) Se selecciona el rotor adecuado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y se coloca éste en la cámara de prueba.
- 3) Se fijan los controles para precalentar el equipo hasta la temperatura de prueba y se espera por aproximadamente 1,5 h o hasta que la temperatura de equilibrio se haya alcanzado en la cámara de prueba y el rotor.
- 4) Se retira la cámara de prueba y se vierte en ella la muestra como se indica en la siguiente Cláusula.

3.5.4 Preparación de la muestra

La preparación de la muestra de cemento asfáltico, se hace de la siguiente manera:

- 1) Se evita el sobrecalentamiento de la muestra o su inflamación.
- 2) Se elige el volumen de la muestra de prueba, entre de 8 y 10 mL, según el rotor seleccionado y de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del equipo; se puede calcular la masa de muestra necesaria considerando su masa específica o densidad.
- 3) Se evita exceder el llenado del contenedor, ya que el resultado de la prueba es muy sensible a la cantidad de muestra que se utilice. El nivel superior de la muestra debe interceptar al brazo del rotor, aproximadamente 3,2 mm arriba de la parte superior de la interfase entre el cuerpo cónico del rotor y su brazo.
- 4) Se agita suficientemente la muestra para homogeneizarla.

3.5.5 Procedimiento de la prueba

Si la prueba se va a realizar a distintas temperaturas, se inicia con la temperatura menor. Se sigue el procedimiento que se describe a continuación para cada una de las temperaturas.

- 1) Una vez preparada la muestra, se coloca de nuevo la cámara de prueba en el contenedor térmico.
- 2) Se ajusta el rotor introduciéndolo despacio y con cuidado hasta que esté sumergido a la profundidad indicada; entonces se mueve la cámara de prueba en un plano horizontal hasta que el rotor esté localizado aproximadamente en el centro de la misma. Es posible que para seleccionar el rotor adecuado, sea necesario realizar la prueba con distintos rotores.
- 3) Se deja reposar la muestra de prueba aproximadamente 15 min., para permitir que se equilibre su temperatura.
- 4) Si se utilizan modelos tipo RV, HA o HB, se hace funcionar el viscosímetro a 20 rpm; si se trata de modelos tipo LV, se hace rotar a 12 rpm, de acuerdo con lo indicado por el fabricante del equipo. Si la lectura del aparato está entre 2 y 98 unidades, se hacen y registran tres lecturas a intervalos de 60 s.
- 5) Si la lectura es mayor de 98 unidades, se disminuye la velocidad del rotor. Si la lectura sigue siendo mayor de 98, se cambia el rotor por el siguiente más pequeño. Al hacer esto, es necesario ajustar el volumen de la muestra de prueba. Cuando la lectura esté entre 2 y 98, se registran las lecturas como se indica en la Fracción anterior.

3.5.6 Cálculos y resultados

Se reporta como resultado de esta prueba, en Pa·s, el promedio de las lecturas observadas en el viscosímetro para cada temperatura de prueba, indicando el número de rotor utilizado. En caso necesario, se harán las conversiones de unidades necesarias, de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

3.5.7 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la

contaminación de las muestras de prueba.

2. Verificar que el equipo esté calibrado de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
3. Mantener constante la velocidad del rotor durante la lectura de las mediciones.
4. Cuidar que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al hacer la prueba la muestra no se mezcle con agentes extraños y se altere el resultado. Se cuida de manera especial la limpieza del rotor. Después de cada determinación, el equipo se limpia utilizando una estopa impregnada con un disolvente apropiado.

3.6 PENETRACIÓN EN CEMENTOS Y RESIDUOS ASFÁLTICOS

3.6.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la consistencia de los cementos asfálticos, así como de los residuos por destilación de las emulsiones y asfaltos rebajados, mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra de prueba de dichos materiales bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.

3.6.2 Equipo

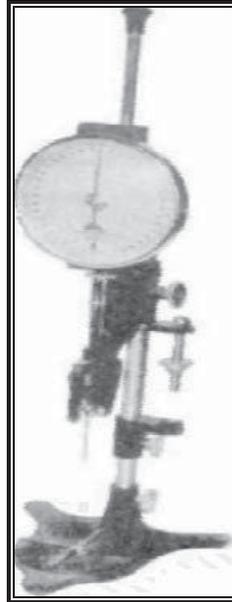
El equipo para la ejecución de la prueba debe estar en condiciones óptimas para su uso, calibrado, limpio, completo en todas sus partes y sin desgaste.

El equipo necesario es el siguiente:

3.6.2.1 Aparato de penetración o penetrómetro para asfaltos

Como el mostrado en la Figura 3.10, capaz de sujetar una aguja como las referidas en la Fracción siguiente y provisto de un dispositivo para medir la profundidad de penetración de la aguja, en décimos de milímetro. También contará con un mecanismo que permita aproximar la aguja a la muestra de prueba y con pesas o lastres de 50 y 100 g.

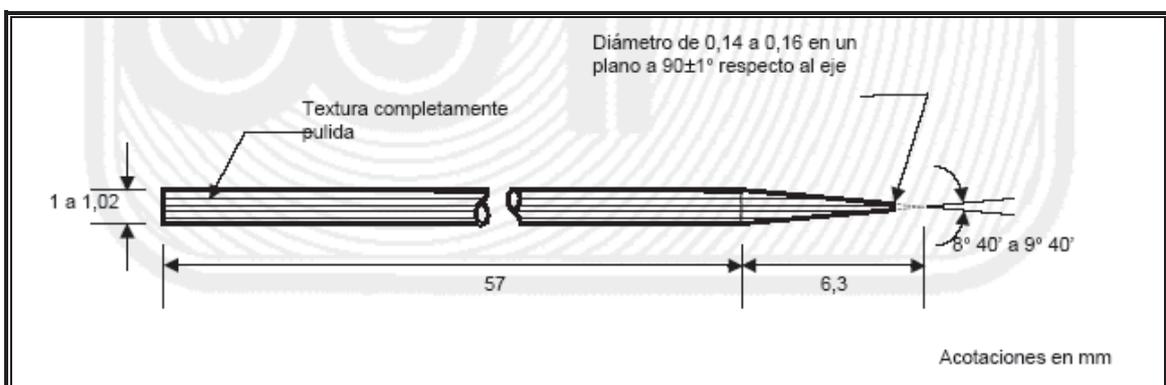
Figura 3. 10 .- Penetrómetro para la prueba de penetración



3.6.2.2 Agujas

De acero inoxidable, totalmente endurecidas y perfectamente pulidas, con la forma y dimensiones que se muestran en la Figura 3.11, que se acoplen al penetrómetro mediante un casquillo de bronce o de acero inoxidable, sobresaliendo de éste último entre 40 y 45 mm.

Figura 3. 11 .- Aguja para la prueba de penetración



3.6.2.3 Cápsula de penetración

De metal o de vidrio refractario, de forma cilíndrica y con el fondo plano; con diámetro interior de 55mm y altura interior de 35mm, para penetraciones menores de 200×10^{-1} mm; o diámetro interior de 70mm y altura interior de 45mm para penetraciones entre 200 y 350×10^{-1} mm.

3.6.2.4 Baño de agua

Con temperatura controlable hasta 50°C y aproximación de 0,1°C, con dimensiones y características tales que le permitan una capacidad mínima de 10 L. Estará provisto de un entrepaño con perforaciones, colocado a no menos de 5 cm del fondo del baño y a no menos de 10 cm de la superficie libre del líquido.

3.6.2.5 Termómetro

Con rango de 0 a 50°C y aproximación de 1°C.

3.6.2.6 Cronómetro

Con aproximación de 0,2 s.

3.6.2.7 Recipiente de manejo

De metal, plástico o vidrio, de forma cilíndrica adecuada para manejar y mantener sumergida la cápsula de penetración que contenga la muestra de prueba; de 350 cm^3 de capacidad y con relieves en el fondo para evitar que la muestra que contiene se mueva durante el proceso de ensaye.

3.6.2.8 Malla n°50

De 300 μm de abertura, cuando se prueben residuos por destilación de emulsiones asfálticas.

3.6.2.9 Espátula de níquel

De 20 cm de longitud, cuando se prueben residuos por destilación.

3.6.3 Preparación de la muestra

La muestra de prueba, según se trate de cemento asfáltico o del residuo por destilación, se prepara como se indica a continuación:

3.6.3.1 Muestra de cemento asfáltico

De la muestra de cemento asfáltico, se toma una porción de volumen ligeramente mayor al de la cápsula de penetración y se calienta en un recipiente apropiado, agitándola en forma continua con el objeto de distribuir la temperatura uniformemente, hasta que adquiera la fluidez suficiente para facilitar su vaciado en dicha cápsula, cuidando que durante su calentamiento no se formen burbujas de aire, que la temperatura alcanzada no exceda de 130°C y que esta operación se realice en un lapso menor de 30 min. Hecho esto, inmediatamente se llena la cápsula con la muestra de prueba, se cubre adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.

3.6.3.2 Muestra del residuo por destilación de una emulsión asfáltica

Inmediatamente después de obtener el residuo por destilación de la emulsión asfáltica, se destapa el alambique utilizado en esa prueba, se homogeneiza su contenido con la espátula y se llena la cápsula de penetración vertiendo el residuo a través de la malla N° 50, se cubre adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.

3.6.3.3 Muestra del residuo por destilación de un asfalto rebajado

Inmediatamente después de obtener el residuo por destilación del asfalto rebajado y tan pronto como deje de vaporizar en la cápsula metálica utilizada en esa prueba, se homogeneiza con la espátula y se llena la cápsula de penetración, se cubre adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.

3.6.4 Procedimiento de la prueba

- 1) Se coloca la cápsula de penetración que contiene la muestra de prueba dentro del recipiente de manejo, para introducirlos posteriormente en el baño de agua, cuando éste mantenga una temperatura de 25°C o la que se especifique para la prueba. Se sumerge dicho recipiente completamente y se mantiene así por espacio de 2 h, con objeto de que el producto asfáltico adquiera esa temperatura.
- 2) Se coloca el penetrómetro sobre una superficie plana, firme y sensiblemente horizontal, se le acopla la aguja y se lastra para que el elemento que se desplaza tenga una masa de $100 \pm 0,1$ g o la masa que se especifique para la prueba y finalmente se nivela perfectamente el penetrómetro.
- 3) Se saca del baño de agua el recipiente de manejo, el cual contiene la muestra de prueba en su cápsula de penetración, cuidando que tenga agua suficiente para cubrir completamente la cápsula. Se colocan el recipiente y la cápsula sobre la base del penetrómetro, de tal manera que la muestra quede bajo la aguja. Se ajusta la altura de la aguja hasta que haga contacto con la superficie de la muestra, lo que se logra haciendo coincidir la punta de la aguja con la de su imagen reflejada en la superficie de la muestra.
- 4) Se hace coincidir la manecilla del penetrómetro con el cero de su carátula, hecho esto se oprime el sujetador para liberar la aguja únicamente durante 5 s o durante el tiempo que se especifique para la prueba, después de lo cual se toma la lectura registrándola en décimos de milímetro.
- 5) Se deben hacer por lo menos tres penetraciones sobre puntos diferentes de la superficie de la muestra de prueba, separados entre sí y de la pared de la cápsula de penetración 10 mm como mínimo. Se limpiará cuidadosamente la aguja después de cada penetración sin desmontarla y, de ser necesario, para ajustar la temperatura a 25°C o a la especificada para la prueba, se regresará el recipiente de manejo con la muestra al baño de agua. Para la limpieza de la aguja se utilizará un paño humedecido con tricloroetileno, y después un paño seco y limpio.
- 6) Para materiales asfálticos suaves, con penetraciones mayores de 225×10^{-1} mm, se tienen que emplear por lo menos tres agujas, las que se deben ir dejando introducidas en la muestra de prueba al hacer las penetraciones.

3.6.5 Cálculos y resultados

Se reporta como resultado de la prueba, el promedio de las profundidades a las que haya entrado la aguja en por lo menos tres penetraciones, expresadas en décimos de milímetro y con aproximación a la unidad, valor conocido también como grado de penetración. Las penetraciones utilizadas para el cálculo del promedio, deben estar dentro de las diferencias permisibles mostradas en la Tabla 3.9, de lo contrario la prueba se repetirá. En el reporte quedarán asentados la temperatura, la masa y el tiempo de penetración con los que se realice la prueba.

Tabla 3.9 .- Diferencias permisibles entre los valores de penetración considerados para el cálculo de resultados

Valor de la penetración	Diferencias permisibles
0 - 49	2
50 - 149	4
150 - 249	6
250 ó más	8

Unidades en 1×10^{-1} mm (Grados de penetración)

3.6.6 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observarán las siguientes precauciones:

- 1) Tener especial cuidado en realizar la prueba bajo las condiciones de temperatura, masa y tiempo de penetración que se especifiquen.
- 2) Cuidar que no exista aire atrapado en la muestra de prueba.
- 3) Confirmar que la aguja esté perfectamente limpia en el momento de la penetración.
- 4) Verificar que la aguja esté en contacto con la superficie de la muestra de prueba al iniciar la penetración.
- 5) Cuidar que la aguja no toque el fondo del recipiente antes de finalizar el tiempo especificado.

3.7 PUNTO DE INFLAMACIÓN CLEVELAND EN CEMENTOS ASFÁLTICOS

3.7.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la temperatura mínima a la que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto con el fuego directo, así como aquella en que inicia su combustión. La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en una copa abierta de Cleveland, en donde se incrementa paulatinamente su temperatura hasta lograr que al pasar una flama por la superficie de la muestra se produzcan en ella flamas instantáneas, la temperatura correspondiente se denomina punto de inflamación. Si se continúa elevando la temperatura de la muestra se llega al punto en que se inicia la combustión del material, la temperatura correspondiente se denomina punto de combustión.

3.7.2 Equipo

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

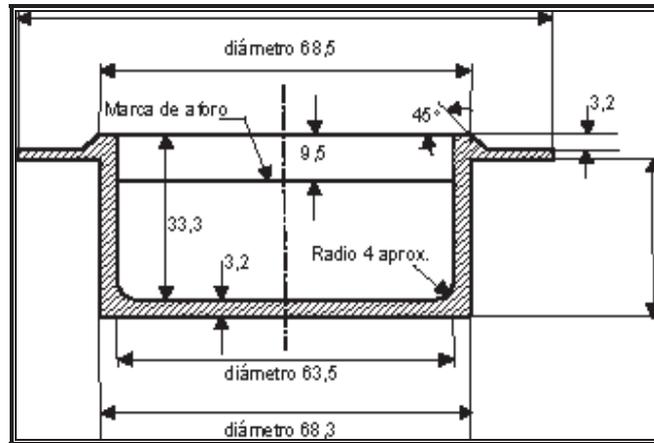
3.7.2.1 Copa abierta de cleveland

De latón, bronce o acero inoxidable, con la forma y dimensiones indicadas en la Figura 3.12.

3.7.2.2 Soporte para la copa abierta de Cleveland

Como el mostrado en la Figura 3.12, provisto de una placa de apoyo metálica y otra de asbesto, ambas con las características indicadas en la Figura 3.13.

Figura 3. 12 .- Copa abierta de Cleveland



3.7.2.3 Parrilla eléctrica o mechero

Adaptada para controlar en forma uniforme la aplicación de calor. Si se emplea un mechero, se protegerá de las corrientes de aire o de la luz excesiva en el sitio de trabajo, mediante una pantalla que no sobresalga del nivel superior de la placa de apoyo.

Figura 3.13 .- Montaje del equipo

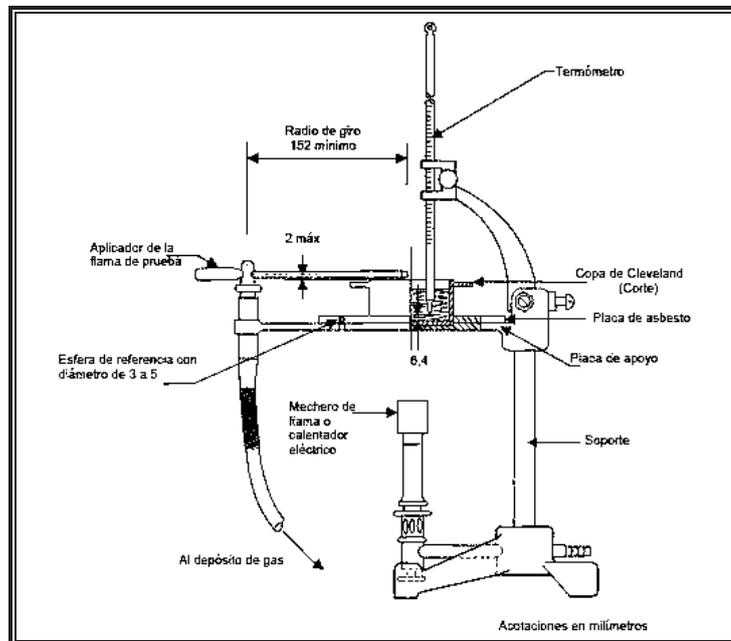
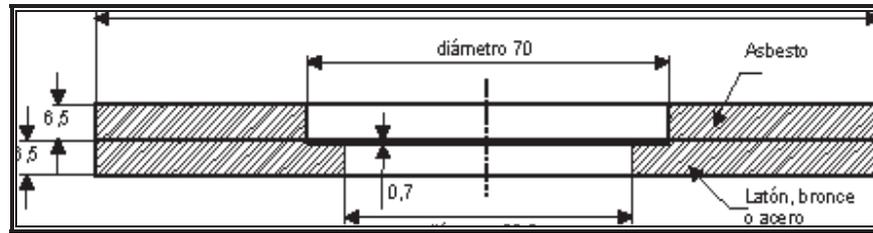


Figura 3. 14 .- Placa circular de apoyo para la copa de Cleveland



3.7.2.4 Termómetro de inmersión parcial

Con bulbo de 25 mm de longitud, con rango de -6 a 400°C y aproximación de 2°C .

3.7.2.5 Aplicador de flama

Con dimensiones aproximadas de 1,6 mm de diámetro en el extremo de salida y orificio de 0,8 mm de diámetro, acoplado al soporte de tal forma que le permita girar en un plano horizontal que diste 2 mm como máximo del borde superior de la copa de Cleveland, como se muestra en la Figura 3.11.

3.7.2.6 Barómetro

Para determinar la presión atmosférica en kPa o mm de mercurio.

3.7.3 Preparación de la muestra

De la muestra de cemento asfáltico, se toma una porción de volumen ligeramente mayor al de la copa abierta de Cleveland y se calienta en un recipiente apropiado, agitándola en forma continua para distribuir la temperatura uniformemente, hasta que adquiera la fluidez suficiente que facilite su vaciado en la copa, cuidando que la temperatura alcanzada no exceda de 130°C .

3.7.4 Procedimiento de la prueba

1) Se monta y sujeta el termómetro de manera que el extremo inferior del bulbo quede a 6,4 mm del fondo de la copa abierta de Cleveland, previamente colocada en la placa

de apoyo, en un punto situado a la mitad de la distancia entre el centro y la pared de la copa opuesta al aplicador de flama; cuidando que el eje de giro del aplicador de flama, el centro de la copa y el eje del termómetro queden en el mismo plano vertical como se muestra en la Figura 3.11.

2) Se vacía lentamente en la copa abierta de Cleveland el material asfáltico preparado, hasta que la parte superior del menisco coincida con la marca de aforo de la copa, destruyendo cualquier burbuja que se forme en la superficie de la muestra de prueba vertida. En el caso de rebasar la marca de aforo se eliminará el exceso de asfalto utilizando cualquier medio apropiado.

3) Se enciende el aplicador de flama y se ajusta ésta para que tenga un diámetro aproximado de 3 a 5 mm, lo cual se verificará por comparación con una esfera de referencia, instalada en la placa de apoyo como se muestra en la Figura 3.11, después de lo cual el aplicador se mantiene alejado de la copa mientras no se le requiera.

4) Se aplica calor a la muestra de prueba de manera que su temperatura aumente a razón de 14 a 17°C/min., hasta que alcance una temperatura aproximada de 60°C abajo del punto de inflamación probable. A continuación, se reduce gradualmente el calor aplicado a la copa de manera que al llegar la muestra a 30°C abajo del punto de inflamación probable, el incremento de temperatura sea de 5 a 6°C/min.

5) Cuando la temperatura de la muestra de prueba sea de 30°C abajo del punto de inflamación probable, se inicia la aplicación de la flama pasándola de lado a lado de la copa, sobre el centro de la misma y con movimiento circular uniforme de manera que la duración del paso de la flama sobre la copa sea de 1 s aproximadamente y que el aplicador gire lo suficiente hasta formar un ángulo recto con el diámetro de la copa que pasa por el eje del termómetro. El centro de la flama de prueba se debe mover en un plano horizontal situado a no más de 2 mm arriba del borde superior de la copa. La flama se aplicará cada vez que la temperatura de la muestra se eleve 2°C.

6) Se registra como punto de inflamación (t_1), en grados Celsius con aproximación de 2°C, la temperatura leída en el termómetro cuando al pasar el aplicador se produzca una pequeña flama instantánea o destello en cualquier punto de la superficie de la muestra, teniendo cuidado de no confundirla con el pequeño halo que suele tener la flama del aplicador.

7) Se continúa incrementando la temperatura de la muestra de prueba a razón de 5 a 6°C/min., pasando el aplicador de flama cada incremento de 2°C, hasta que se produzcan flamas que duren por lo menos 5 s, registrando en este momento la temperatura alcanzada (t_2), como el punto de combustión, en °C, con aproximación de 2°C.

3.7.5 Cálculos y resultados

Si la presión barométrica del lugar donde se efectúe la prueba, no es de 101,3 kPa (760 mm de mercurio), se corrigen las temperaturas t_1 y t_2 aplicando una de las siguientes formulas:

$$t_n' = t_n + 0,25 (101,3 - P)$$

$$t_n' = t_n + 0,033 (760 - p)$$

Donde:

t_n' = Temperatura t_1 o t_2 , corregida por presión barométrica, (°C)

t_n = Temperatura t_1 o t_2 , registrada durante la prueba, (°C)

P = Presión barométrica del lugar en que se efectúe la prueba, (kPa)

p = Presión barométrica del lugar en que se efectúe la prueba, (mm Hg)

Se reportan como punto de inflamación y punto de combustión del cemento asfáltico las temperaturas t_1 y t_2 , respectivamente, corregidas en su caso por presión barométrica (t_1' y t_2'), con aproximación de 2°C.

3.7.6 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observarán las siguientes precauciones:

1. Realizar la prueba en un local libre de corrientes de aire y relativamente oscuro para que se puedan identificar fácilmente las flamas.
2. Evitar agitar los vapores que se desprendan de la copa al aplicar la flama de prueba, no haciendo movimientos bruscos ni respirando cerca de ella.
3. Lavar la copa con un disolvente adecuado para eliminar cualquier residuo de la prueba anterior. Si contiene partículas de carbón removerlas con fibra de acero y lavarla con agua fría, después acercarla a una flama o colocarla sobre una parrilla eléctrica para eliminar el disolvente y el agua.

3.8 PUNTO DE REBLANDECIMIENTO EN CEMENTOS ASFÁLTICOS

3.8.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite estimar la consistencia de los cementos asfálticos y se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 mm, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua o glicerina.

3.8.2 Equipo y materiales

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

El equipo y los materiales necesarios son los siguientes:

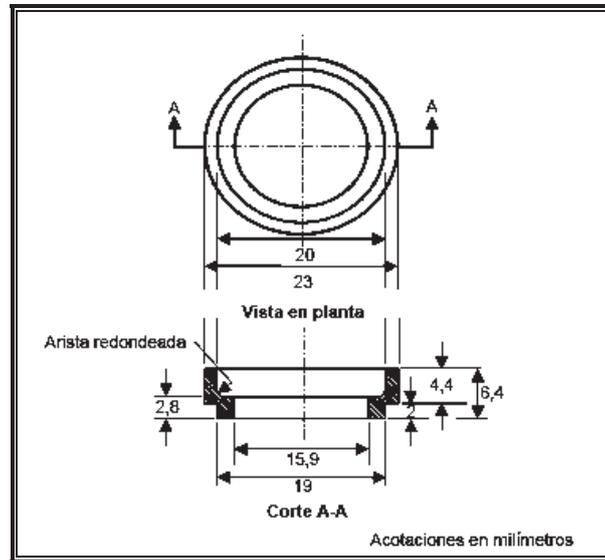
3.8.2.1 Anillos

Dos anillos de latón, con el diseño y dimensiones señalados en la Figura 3.16.

3.8.2.2 Vaso de vidrio refractario

Con diámetro interior mínimo de 85 mm y altura de 120 mm.

Figura 3. 15 .- Anillo para la prueba de punto de reblandecimiento



3.8.2.3 Sistema de soporte

Un portanillos de latón, con la forma y dimensiones señaladas en la Figura 3.17, con un soporte de metal resistente a la corrosión, integrado por dos columnas que sostengan al portanillos y a una placa rectangular inferior, de forma que la distancia entre la parte inferior de aquel y la superior de ésta sea de 25 mm, y sujetas a una placa circular que sirva de tapa para el vaso refractario. El soporte debe estar dispuesto de manera que la parte inferior de la placa rectangular se ubique a 16 ± 3 mm del fondo del vaso, como se muestra en la Figura 3.18.

Figura 3. 16 .- Portanillos para la prueba de punto de reblandecimiento

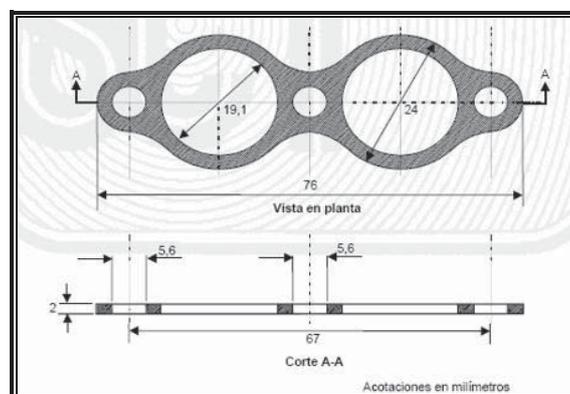
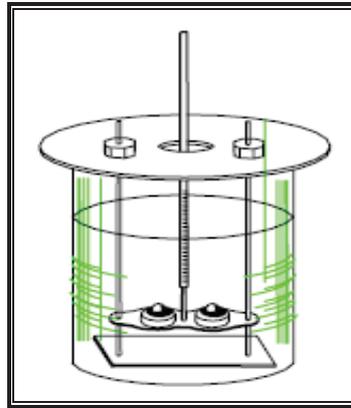


Figura 3. 17 .- Montaje del sistema de soporte



3.8.2.4 Esferas

Dos esferas de acero, de 9,5 mm de diámetro y de $3,5 \pm 0,05$ g de masa.

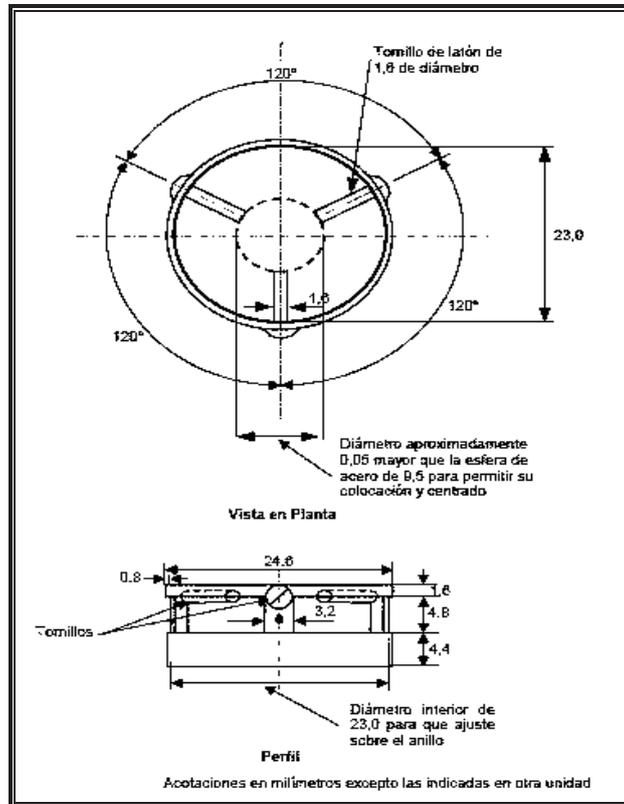
3.8.2.5 Guías

Dos guías de latón para centrar las esferas, con la forma y dimensiones mostradas en la Figura 3.19.

3.8.2.6 Placa de apoyo

Plana, lisa y rígida, de latón o bronce, de 5×10 cm como mínimo.

Figura 3. 18 .- Guía para centrar la esfera



3.8.2.7 Parrilla eléctrica o mechero

Adaptada para controlar la aplicación de calor. Si se emplea un mechero, se debe proteger de las corrientes de aire o de la radiación excesiva, mediante una pantalla que no sobresalga del nivel inferior del vaso.

3.8.2.8 Termómetro

De inmersión total con rango de -1 a 175°C y aproximación de $0,5^{\circ}\text{C}$.

3.8.2.9 Pinzas

Adecuadas para manejar las esferas.

3.8.2.10 Espátula o cuchillo

De acero flexible, de 15 mm de ancho y 150 mm de largo.

3.8.2.11 Agua limpia o glicerina

Agua potable cuando se prueben cementos asfálticos con punto de reblandecimiento menor de 80°C o glicerina para temperaturas mayores.

3.8.2.12 Antiadherente

Aceite o grasa de silicón; una mezcla de glicerina y dextrina; talco o caolín, para recubrir la placa de apoyo y evitar su adherencia con el asfalto.

3.8.2.13 Paño

Para aplicar el antiadherente en la placa de apoyo.

3.8.3 Preparación de la muestra

La muestra de cemento asfáltico, se prepara de la siguiente manera:

- 1) De la muestra se toma una porción de volumen ligeramente mayor al necesario para llenar los anillos y se calienta en un recipiente apropiado, agitándola en forma continua para distribuir la temperatura uniformemente, hasta que adquiera la fluidez que permita su vaciado en los anillos, cuidando que durante su calentamiento y vaciado no se formen burbujas de aire, que la temperatura alcanzada no exceda 130°C y que esta operación se realice en un lapso menor de 60 min.
- 2) Se calientan los anillos a una temperatura aproximadamente igual a la de la muestra y se colocan sobre la placa de apoyo, la que se prepara previamente para que no se le adhiera la muestra de cemento asfáltico, aplicándole con el paño el antiadherente seleccionado. A continuación se vierte en los anillos el cemento asfáltico, se cubren adecuadamente para protegerlos del polvo y se deja enfriar

durante aproximadamente 30 min. para que recobre su consistencia sólida, debiendo alcanzar una temperatura de cuando menos 10°C debajo de la que corresponda al punto de reblandecimiento estimado. Enseguida se corta el exceso de material asfáltico con la espátula o el cuchillo calentados previamente para facilitar el corte.

3.8.4 Ejecución de la prueba

- 1) Se ensambla el sistema de soporte colocando en su lugar los anillos con la muestra de prueba, las guías y el termómetro de manera que la parte inferior de su bulbo quede al mismo nivel que la parte inferior de los anillos, sin que toque las paredes del orificio central del portanillos. Se llena el vaso de vidrio hasta una altura de 10 cm, con agua potable a $5 \pm 1^\circ\text{C}$ si el punto de reblandecimiento esperado es menor de 80°C o glicerina a $30 \pm 1^\circ\text{C}$ si es mayor y con las pinzas se colocan las esferas en el fondo del vaso. Se introduce en el vaso el sistema de soporte y se deja el conjunto durante 15 min., manteniéndolo a la temperatura indicada para el líquido que se utilice, introduciendo el vaso en agua helada si es necesario.
- 2) Se extrae el sistema de soporte, con las pinzas se colocan las esferas en las guías e inmediatamente se vuelve a introducir en el vaso, quedando el montaje del equipo como se ilustra en la Figura 3.18.
- 3) Se coloca el conjunto en la parrilla eléctrica o mechero y se incrementa uniformemente la temperatura del líquido a razón de $5^\circ\text{C}/\text{min.}$, con una tolerancia $\pm 0,5^\circ\text{C}$ en lecturas hechas cada minuto después de los primeros 3 min.
- 4) Se registra para cada anillo la temperatura en el momento en que el material asfáltico toque la placa inferior del soporte, con aproximación de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Las temperaturas registradas no deben diferir entre sí en más de 1°C , de lo contrario se debe repetir la prueba utilizando una nueva muestra de prueba.

3.8.5 Resultados

Se reporta como punto de reblandecimiento del cemento asfáltico el promedio de las temperaturas registradas como se indica en pasos anteriores, con aproximación de $0,5^\circ\text{C}$, indicando el líquido utilizado para la prueba.

3.8.6 Recomendaciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, deben observarse las siguientes precauciones:

- 1) Cuidar que durante el llenado de los anillos no se formen burbujas de aire en la superficie o en el interior de la muestra de prueba.
- 2) Realizar la prueba en un local libre de corrientes de aire.
- 3) Cuidar que la temperatura con la que se inicie la prueba corresponda a la establecida para el líquido con el que se llene el vaso.
- 4) Evitar durante la prueba que la temperatura se eleve en incrementos diferentes al especificado.
- 5) Lavar los anillos con un disolvente adecuado para eliminar cualquier residuo de la prueba anterior. Si contienen partículas de carbón, removerlas con fibra de acero, lavarlos con agua fría y después acercarlos a una flama o colocarlos sobre la parrilla eléctrica para eliminar el disolvente y el agua.

3.9 PRUEBAS EN EL RESIDUO DE LA PELÍCULA DELGADA DE CEMENTOS ASFÁLTICOS

3.9.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite estimar el endurecimiento que sufren los cementos asfálticos que en películas de pequeño espesor se someten a los efectos del calor y el aire. La prueba consiste en someter una muestra de cemento asfáltico a un proceso de calentamiento para producir un residuo al cual, dependiendo del tipo de cemento asfáltico que se esté probando, se le realizan diversas pruebas. En el caso de cementos asfálticos normales, al residuo se le efectúan pruebas para determinar la pérdida de masa que experimentó, su viscosidad dinámica, la penetración que conserva respecto a la del cemento asfáltico original, así como su ductilidad; si se trata de cementos asfálticos modificados, al residuo se le efectúan pruebas para determinar la pérdida de masa que experimentó, la penetración del residuo y la penetración que conserva respecto a la del cemento asfáltico modificado original, su ductilidad, recuperación elástica en

ductilómetro, incremento en temperatura anillo y esfera (punto de reblandecimiento), módulo reológico de corte dinámico, así como su ángulo fase.

3.9.2 Equipo y materiales

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

3.9.2.1 Horno eléctrico

Con interior de forma cúbica de 31 cm por lado como mínimo, de doble pared, con control termostático que permita mantener una temperatura máxima 180°C, con aproximación de 1°C, provisto de una puerta con cierre hermético que permita descubrir todo el espacio interior; dicha puerta tendrá una ventana de doble pared de vidrio, con dimensiones mínimas de 10 cm por lado, a través de la cual se pueda leer un termómetro situado verticalmente en el interior, o bien, estará provisto de una puerta interior adicional de vidrio para el mismo fin. El horno tendrá aberturas para ventilación en el fondo y en la cubierta o en la parte superior e inferior de las paredes laterales.

Estará provisto de una plataforma metálica circular de aproximadamente 25 cm de diámetro, como mínimo, suspendida en posición horizontal en el centro del horno y con un dispositivo que le permita girar a razón de 5 a 6 rpm; la plataforma proporcionará una superficie plana de soporte para las charolas, pero sin bloquear la circulación del aire cuando dichas charolas estén colocadas en su lugar dentro del horno.

3.9.2.2 Charolas

De aluminio o acero inoxidable, redondas, de fondo plano, de 0,76 mm de espesor, 140 mm de diámetro interior y 9,6 mm de altura, de tal manera que al colocar en ellas una muestra de prueba de aproximadamente 50 cm³, se forme una película de 3 mm de espesor.

3.9.2.3 Termómetro

De inmersión total, con escala que abarque de 155 a 170°C y aproximación de 1°C.

3.9.2.4 Balanza

Con capacidad mínima de 150 g y aproximación de 1 mg.

3.9.2.5 Placas de asbesto-cemento

Con tamaño suficiente que abarque toda la superficie de las charolas colocadas dentro del horno.

3.9.2.6 Equipo y material para la prueba de viscosidad dinámica

Todo el que se indica en la prueba de Viscosidad Dinámica de Cementos y Residuos Asfálticos.

3.9.2.7 Equipo y material para la prueba de penetración

Todo el que se indica en la prueba de Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos.

3.9.2.8 Equipo y material para la prueba de punto de reblandecimiento

Todo el que se indica en la prueba de Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos, en el caso de que se prueben cementos asfálticos modificados.

3.9.2.9 Equipo y material para la prueba de ductilidad

Todo el que se indica en la prueba de Ductilidad de Cementos y Residuos Asfálticos.

3.9.2.10 Equipo y material para la prueba de módulo reológico de corte dinámico y obtención del ángulo fase

Todo el que se indica en la prueba de Módulo Reológico de Corte Dinámico, en el caso de que se prueben cementos asfálticos modificados.

3.9.2.11 Equipo y material para la prueba de recuperación elástica en ductilómetro

Todo el que se indica en la prueba de Recuperación Elástica en Ductilómetro, en el caso de que se prueben cementos asfálticos modificados.

3.9.3 Preparación de la muestra

La preparación de la muestra de cemento asfáltico, se hace de la siguiente manera:

- 1) De la muestra se toma una porción ligeramente mayor de 150 g y se le aplica el calor indispensable para fluidificarla, agitándola continuamente para homogeneizar su temperatura y evitar sobrecalentamientos locales, cuidando que la temperatura alcanzada no sea mayor de 130°C y que no se formen burbujas de aire. En tres charolas previamente taradas, se vierten $50 \pm 0,5$ g de la muestra.
- 2) En caso de que no se cuente previamente con el valor de la penetración en el asfalto original (P_i), se preparará la muestra de prueba correspondiente y se obtendrá dicho valor.

3.9.4 Procedimiento de la prueba

- 1) Se dejan enfriar las muestras colocadas en las charolas hasta la temperatura ambiente, posteriormente se obtienen sus masas por separado con aproximación de ± 1 mg, anotado cada una de estas masas como W_{i1} , W_{i2} ,... W_{in} , respectivamente.
- 2) Se nivela el horno con objeto de que la plataforma gire en un plano sensiblemente horizontal. El termómetro se sujeta paralelamente al eje vertical de la plataforma, colocándolo a la mitad del radio de la misma y cuidando que el bulbo quede 6 mm arriba de la plataforma aproximadamente.
- 3) En el momento en que el horno alcance la temperatura de 163°C, se colocan sobre la plataforma las charolas que contienen las muestras de prueba, se cierra el horno y se hace girar dicha plataforma a una velocidad 5 a 6 rpm. La temperatura dentro del horno se mantiene a 163 ± 1 °C durante un periodo de 5 h, contadas a partir de que la temperatura, que debe haber descendido al introducir las charolas, alcance nuevamente

163°C. En ningún caso el tiempo total que permanezcan las muestras de prueba en el horno será mayor de 5,25 h.

- 4) Al finalizar el periodo de calentamiento, se sacan las muestras del horno, se enfrían hasta alcanzar la temperatura ambiente, se obtienen sus masas por separado con aproximación de ± 1 mg y se registra cada una de estas masas como W_{f1} , W_{f2} , ..., W_{fn} , respectivamente.
- 5) Se prepara el residuo para efectuar las pruebas restantes, ya sean para cemento asfáltico normal o modificado, colocando las charolas sobre las placas de asbesto-cemento; después se acomoda el conjunto sobre la plataforma circular, se introduce en el horno, que estará a una temperatura de 163°C y se hace girar la plataforma a una velocidad de 5 a 6 rpm durante 15 min. Hecho esto, se sacan las charolas del horno y se vierte su contenido en una sola de ellas con ayuda de una espátula, agitándolo para homogeneizarlo.
- 6) Una vez homogeneizado el residuo, se vierte en los moldes apropiados para luego realizar las pruebas aplicables dependiendo del tipo de cemento asfáltico, pudiendo ser éstas:
 - a) Viscosidad dinámica a 60°C, tanto en cementos asfálticos normales como modificados.
 - b) Penetración (P_f) a 25°C, 100 g y 5 s cuando se trate de cementos asfálticos normales o a 4°C, 200g y 60 s en el caso de cementos asfálticos modificados
 - c) Punto de reblandecimiento cuando se trate de cementos asfálticos modificados, para conocer el incremento en temperatura anillo y esfera.
 - d) Ductilidad a 25°C y 5 cm/min. cuando se trate de cementos asfálticos normales ó a 4°C y 5 cm/min. en el caso de cementos asfálticos modificados.
 - e) Módulo reológico de corte dinámico y ángulo fase, a 76°C, en cemento asfáltico modificado.
 - f) Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C en cemento asfáltico.

3.9.5 Cálculos y resultados

1. Para determinar la pérdida de masa por calentamiento del cemento asfáltico, se sigue el siguiente procedimiento:

- a) Se calcula la pérdida de masa por calentamiento en cada una de las muestras de prueba, determinadas con la siguiente fórmula:

$$W_{C_n} = \frac{W_{i_n} - W_{f_n}}{W_{i_n}} \times 100$$

Donde:

W_{cn} = Pérdida de masa por calentamiento en la muestra de prueba n, (%)

W_{in} = Masa inicial de la muestra de prueba n, (g)

W_{fn} = Masa final de la muestra de prueba n, (g)

Se reporta como la pérdida de masa por calentamiento del cemento asfáltico (W_c), el promedio de la pérdida en cada una de las muestras de prueba, con la siguiente fórmula:

$$W_c = \frac{\sum_{n=1}^n W_{C_n}}{n}$$

Donde:

W_c = Pérdida de masa por calentamiento en el cemento asfáltico, (%)

W_{cn} = Pérdida de masa por calentamiento en la muestra de prueba n, (%)

n = Número de muestras de prueba (charolas)

- b) Se calcula y reporta el valor de la viscosidad dinámica en el residuo
- c) La penetración retenida en el residuo, se expresa como por ciento de la penetración en el cemento asfáltico original, mediante la siguiente fórmula:

$$P_r = \frac{P_f}{P_i} \times 100$$

Donde:

P_r = Penetración retenida por el residuo de cemento asfáltico, (%)

P_i = Penetración en el cemento asfáltico original, (1×10^{-1} mm)

P_f = Penetración en el residuo de cemento asfáltico, (1×10^{-1} mm)

2. En el reporte se incluirá la temperatura, masa de la muestra de prueba y tiempo, utilizados en la ejecución la prueba.
3. En el caso en que se trate de cementos asfálticos modificados, se calcula y reporta el valor del incremento de la temperatura de la prueba de punto de reblandecimiento, utilizando la siguiente fórmula:

$$I_T = T_2 - T_1$$

Donde:

I_T = Incremento en temperatura anillo y esfera, (°C)

T_1 = Punto de reblandecimiento del cemento asfáltico modificado original, (°C)

T_2 = Punto de reblandecimiento del residuo de cemento asfáltico modificado, (°C)

5. Se calcula y reporta el valor de la ductilidad en el residuo, incluyendo en el reporte la temperatura a la que se efectuó la prueba.
6. En el caso en que se trate de cementos asfálticos modificados, se calcula y reporta el valor del módulo reológico de corte dinámico y el ángulo fase.
7. En el caso en que se trate de cementos asfálticos modificados, se calcula y reporta el valor de la recuperación elástica en ductilómetro.

3.9.6 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

- 1) Realizar la prueba bajo las condiciones de temperatura y tiempo que se indican.
- 2) Cumplir con todas las indicaciones y precauciones.

3.10 MÓDULO REOLÓGICO DE CORTE DINÁMICO

3.10.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar el módulo reológico de corte dinámico y el ángulo fase, como propiedades viscoelásticas lineales de un cemento asfáltico, sometiendo una muestra a esfuerzos de torsión utilizando un reómetro dinámico de corte. Es aplicable a cementos asfálticos con módulos complejos en el rango de 0,1 a 1 000 kPa, los que se obtienen en forma típica entre 5 y 85°C.

3.10.2 Equipo

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

3.10.2.1 Sistema de prueba del reómetro de corte dinámico (DSR)

Como el mostrado en la Figura 3.22, que cuente con:

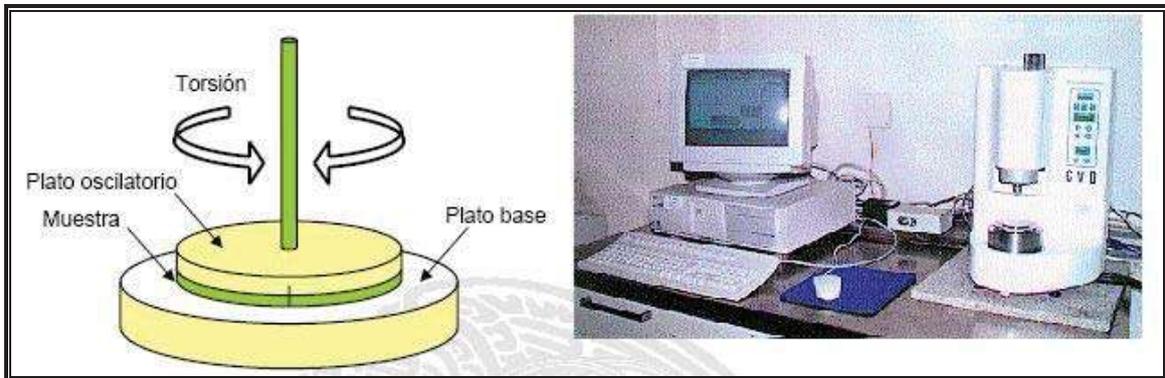
1.- Plato base

Metálico, con superficies pulidas, con las dimensiones adecuadas según el plato oscilatorio que emplee. En algunos reómetros este plato puede ser plano.

2.- Platos oscilatorios

Metálicos, con superficies pulidas, con diámetros de $8 \pm 0,05$ mm o $25 \pm 0,05$ mm. El plato de 8 mm es recomendable cuando se realiza la prueba a una temperatura aproximada de 40°C y el de 25 mm para temperaturas superiores. Es conveniente que tengan una pestaña o anillo en su perímetro, con una altura de 2 a 5 mm, esto para facilitar el recorte de la muestra y mejorar la repetibilidad de la prueba.

Figura 3. 19 .- Reómetro de corte dinámico típico



3.- Cámara ambiental

Capaz de controlar la temperatura de la muestra con aproximación de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, mediante gas o líquido, tal como el nitrógeno o el agua, que no afecten las propiedades de la muestra. Si se utiliza agua, se contará con un secador para prevenir la condensación de la humedad en los platos y los demás aditamentos, además de evitar la formación de hielo si se está trabajando a temperaturas bajo cero. Tendrá las dimensiones adecuadas para contener los platos a que se refieren los Incisos 1 y 2 y minimizar los gradientes térmicos. Que cuente con:

a) Controlador de temperatura

Capaz de mantener la temperatura de la muestra con aproximación de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, para rangos de prueba de 5 a 85°C .

b) Detector de temperatura

Detector de resistencia térmica (RTD), de platino (clase A) o equivalente, que cumpla con la norma DIN 43760, con rango de 5 a 85°C y aproximación de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. El detector estará montado dentro de la cámara ambiental en contacto con el plato, para controlar en forma continua la temperatura en la cámara durante el montaje de la muestra, su acondicionamiento y la prueba. El RTD se calibrará como una unidad integral con su respectivo medidor o circuito electrónico.

c) Detector térmico de referencia

Puede ser un termistor o un detector de resistencia térmica (RTD) montados en un sello de silicón, o bien un termocople.

4.- Dispositivo de carga

Capaz de proporcionar una carga sinusoidal de esfuerzo o deformación controlados, con una frecuencia de $10 \pm 0,1$ rad/s; si se utilizan frecuencias distintas, éstas tendrán una precisión de $\pm 1\%$. Cuando la carga sea de deformación controlada, el dispositivo será capaz de aplicar una torsión cíclica suficiente para causar una deformación rotacional angular con una precisión de ± 100 μ rad de la deformación especificada; cuando la carga sea de esfuerzo controlado, la fuerza de torsión cíclica aplicada tendrá una precisión de ± 10 mN·m de la torsión especificada. El rendimiento total del sistema a una torsión de 100 N·m será menor de 2 mrad/N m.

5.- Sistema de control y registro de datos

Que cuente con los dispositivos necesarios para registrar la temperatura, la frecuencia, el ángulo de giro y la fuerza o deformación por torsión. Dichos dispositivos cumplirán con las precisiones indicadas en la Tabla 3.10. Adicionalmente, el sistema será capaz de calcular y registrar el esfuerzo y la deformación cortantes, el módulo complejo (G^*) en un rango de 0,1 a 1 000 kPa con aproximación de 0,5% y el ángulo fase (δ) en un rango de 0 a 90° con aproximación de 0,1°.

Tabla 3. 10 .- Precisión del sistema de control y registro de datos

Parámetro	Aproximación
Temperatura	$\pm 0,1^\circ\text{C}$
Frecuencia	$\pm 1\%$
Ángulo de giro	± 100 μ rad
Torsión	± 10 mN·m

3.10.2.2 Molde para formar la muestra

De silicón, que tenga un diámetro aproximadamente igual al plato superior y una profundidad aproximada igual a 1,5 veces el espesor que se fije para la muestra, que puede ser 1 mm o 2 mm.

3.10.2.3 Dispositivo para ajustar (recortar) las muestras

Con una punta afilada, de 4 mm de ancho como mínimo.

3.10.2.4 Detector calibrado de temperatura

Para medir la temperatura de la muestra. Puede ser un termocople calibrado, un termistor o un detector de resistencia térmica (RTD) con espesor o diámetro de 2 mm o menor. Los termistores y termocoples no son confiables para precisiones mayores de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ a menos que se calibren de acuerdo con el estándar del National Institute of Standards and Technology (NIST), utilizando sus propios medidores o circuitos electrónicos. Los RTD de platino no son adecuados, ya que son demasiado largos para ajustarse en el espacio entre los platos en el reómetro de corte dinámico (DSR).

3.10.3 Calibración del equipo

La calibración del equipo se realizará por lo menos cada 6 meses, considerando lo siguiente:

3.10.3.1 Temperatura

Debido a la existencia de gradientes térmicos dentro del reómetro y la dificultad para calibrar el RTD mientras ésta montado en el reómetro, es necesario hacer una medición directa de la temperatura entre los platos utilizando un espécimen y un detector térmico de referencia. Para verificar las mediciones de temperatura se procede como sigue:

- 1) Se prepara un espécimen de cemento asfáltico o de silicón, dicho espécimen se utilizará únicamente para verificar las mediciones de temperatura, ya que las medidas de corte dinámico no son válidas cuando el detector de referencia se inserta dentro de la muestra.
- 2) Se coloca el espécimen entre los platos y se registra su temperatura con el detector térmico de referencia, que puede ser un termistor, un detector de resistencia térmica (RTD) o un termocople.
- 3) Se ajusta la temperatura en la cámara ambiental a la mínima que se utilizará para la prueba y se espera hasta que llegue al equilibrio; hecho esto, se toma la lectura inicial del RTD del reómetro y la temperatura del espécimen medida con el detector térmico de referencia. Se aumenta la temperatura en incrementos no mayores de 6°C y se repiten las mediciones hasta cubrir el rango de temperaturas de prueba.
- 4) Utilizando las mediciones resultantes, se obtiene la diferencia entre las temperaturas obtenidas con el RTD del reómetro y el detector térmico de referencia insertado en el espécimen. Es de esperar que la diferencia entre las mediciones no sea constante y varíe con la temperatura de prueba.
- 5) Si las mediciones a que se refiere el Inciso anterior varían en más de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, se ajustará el RTD del reómetro de tal forma que la lectura de la temperatura de prueba coincida con la que se obtiene con el detector térmico de referencia en el espécimen colocado entre los dos platos.
- 6) El RTD del reómetro puede ser calibrado por el proveedor del equipo. Se puede verificar la calibración comparando la lectura del RTD con la de un termómetro de mercurio de inmersión parcial con un rango apropiado que esté debidamente calibrado, uniéndolos mediante una banda de hule y sumergiéndolos en un baño de agua en movimiento puesto a temperatura constante con una variación no mayor de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

3.10.3.2 dispositivo de carga

El dispositivo de carga, se calibrará de acuerdo con las instrucciones del fabricante del equipo.

3.10.3.3 Verificación de todo el sistema de prueba

Para verificar la calibración de todo el sistema, se pueden utilizar fluidos con características viscoelásticas similares a los cementos asfálticos. Se pueden utilizar fluidos con módulo complejo y ángulo fase conocidos dentro del rango de mediciones de la prueba; sin embargo, ya que los fluidos de referencia no tienen la misma sensibilidad a la temperatura que los cementos asfálticos, se debe tener mucho cuidado en la interpretación de los resultados obtenidos de dichos fluidos. No es recomendable tratar de verificar individualmente los detectores de carga o giro mediante un fluido de referencia.

3.10.4 Preparación del equipo

Se prepara el sistema de prueba de acuerdo con las recomendaciones del fabricante del equipo, considerando lo siguiente:

- 1) Se limpian y secan cuidadosamente las superficies de los platos metálicos, para garantizar una adherencia uniforme y firme de la muestra durante su montaje. Se montan firmemente los platos en su sitio y se selecciona la temperatura de prueba de acuerdo con el tipo del cemento asfáltico por probar, a menos que se desee utilizar otra considerando las recomendaciones indicadas en la norma (provisional) AASHTO PP6. Se calienta el reómetro hasta que se estabilice su temperatura a la de prueba $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.
- 2) Una vez que los platos están a la temperatura de prueba o, si ésta se va a realizar en un rango de temperaturas, dichos platos están a la temperatura correspondiente a la mitad del rango, se cierra el espacio entre los platos hasta llegar al “nivel cero” girando manualmente el plato móvil hasta que toque al plato fijo, es decir, cuando el plato móvil deje de girar completamente; hecho lo anterior se ajusta la lectura del micrómetro en ceros o, si esto no es posible, se toma la lectura inicial del micrómetro.

En el caso que se utilice un reómetro con un dispositivo de fuerza normal, se cierra el espacio entre los platos hasta que se toquen y se fija entonces el “nivel cero” cuando la fuerza normal es aproximadamente nula. El soporte, los detectores y demás accesorios en el

reómetro, pueden sufrir cambios volumétricos por temperatura, lo que puede ocasionar que se modifique el “nivel cero” previamente fijado; sin embargo, no es necesario hacer ajustes siempre y cuando las mediciones se hagan en un rango de $\pm 12^{\circ}\text{C}$ respecto a la temperatura a la que fue fijado dicho nivel.

- 3) Una vez fijado el “nivel cero”, se separan los platos hasta que se tenga una distancia de $1 \pm 0,05$ mm en el caso de especímenes de 25 mm de diámetro, o una distancia de $2 \pm 0,05$ mm para especímenes de 8 mm de diámetro.

3.10.5 Preparación de la muestra

La preparación de la muestra de cemento asfáltico modificado, ya sea producto del residuo de la prueba de película delgada, o de una muestra obtenida, se hace de la siguiente manera:

- 1) De la muestra se toma una porción ligeramente mayor al volumen necesario para llenar el molde de silicón (aproximadamente 10 g) y se le aplica el calor indispensable para fluidificarla, agitándola continuamente para homogeneizar su temperatura y evitar sobrecalentamientos locales, cuidando que la temperatura alcanzada no sea mayor de 163°C y que no se formen burbujas de aire. Es recomendable minimizar el tiempo y la temperatura de calentamiento para evitar el endurecimiento de la muestra.
- 2) Si los platos no se encuentran montados en su sitio, se limpian y secan cuidadosamente para garantizar una adherencia uniforme y firme de la muestra. Se introducen los platos en la cámara ambiental del reómetro previamente calentada a 45°C , aproximadamente, hasta que alcancen dicha temperatura; esto producirá el calor suficiente para que la muestra se adhiera adecuadamente a los platos en el momento de presionarla para su ajuste en ellos; en caso que los platos se encuentren colocados en su sitio y a la temperatura aquí indicada, se procederá directamente con lo señalado en la siguiente Fracción.
- 3) Del reómetro previamente preparado, se retira el plato superior o inferior, según su caso. Sobre el plato inferior montado o fuera del reómetro, según el tipo de aparato, se vacía la muestra sobre su centro y en forma continua, cubriéndolo hasta 2 mm antes del perímetro del mismo. El vaciado se hace vertiendo la muestra desde

aproximadamente 15 mm por encima del plato, pudiendo utilizar una jeringa o gotero. Se deja reposar el plato hasta que la muestra de prueba endurezca y se monta nuevamente el plato inferior o el superior en el reómetro.

- 4) Si como alternativa a lo señalado en la Fracción anterior, se prefiere utilizar el molde de silicón, se vacía en él la muestra para formar una pastilla con un espesor aproximado de 1,5 veces la distancia seleccionada entre los platos para la prueba, que puede ser de 1 mm si se utiliza un plato oscilatorio de 25 mm de diámetro, o de 2 mm si dicho plato es de 8 mm de diámetro. Se deja enfriar la muestra a temperatura ambiente, se retira el plato superior o el inferior de la cámara ambiental, según sea el caso, se desmolda la muestra y se centra en dicho plato para montarlo nuevamente en el reómetro inmediatamente. En el caso de asfaltos suaves, para acelerar el enfriamiento de la muestra se puede introducir el molde en una cámara refrigerante el tiempo mínimo indispensable para facilitar el desmolde, que normalmente es menor de 5 min.
- 5) Una vez que la muestra se ha colocado en un plato, se acercan entre sí los platos montados en el reómetro para presionar la muestra entre ellos, hasta que la distancia entre los platos sea 0,05 mm mayor que la distancia especificada para la prueba, que puede ser de 1 mm o 2 mm, como se indica en la Fracción anterior.
- 6) Se recorta cuidadosamente el exceso de la muestra que sobresale del perímetro del plato superior, utilizando una herramienta con filo y previamente calentada.
- 7) Una vez que se ha terminado de recortar la muestra, se reduce el espacio entre los platos los 0,05 mm, para alcanzar la distancia seleccionada para la prueba; esto causará un pequeño abultamiento de la muestra en su periferia.

3.10.6 Determinación de las condiciones de prueba

- 1) Cuando se opera en el modo de deformación controlada, la prueba se hace considerando lo siguiente:
 - a) Cuando la prueba se ejecuta para verificar los requisitos de calidad establecidos, la deformación angular unitaria inducida será de $10 \pm 2\%$. De preferencia se utilizará un reómetro que controle la deformación en forma automática, sin la necesidad de intervención del operador.

- b) Si la prueba se realiza con un fin distinto al indicado en el Inciso anterior, la deformación se determina de acuerdo con el valor del módulo complejo esperado y se controla dentro del rango correspondiente al 20% del valor obtenido mediante la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{12}{(G^*)^{0.29}}$$

Donde:

- γ = Deformación al cortante, (%)
 G^* = Módulo complejo esperado, (kPa)

- 2) Cuando se opera en el modo de esfuerzo controlado, la prueba se hace considerando lo siguiente:

- a) Cuando la prueba se ejecuta para verificar los requisitos de calidad establecidos, el esfuerzo cortante aplicado será de $0,22 \pm 0,04$ kPa. De preferencia se utilizará un reómetro que controle el nivel de esfuerzos en forma automática, sin la necesidad de intervención del operador.
- b) Si la prueba se realiza con un fin distinto al indicado en el Inciso anterior, el nivel de esfuerzos cortantes por aplicar se determina de acuerdo con el valor del módulo complejo esperado y se controla dentro del rango correspondiente al 20% del valor calculado mediante la siguiente expresión:

$$\tau = 0.12(G^*)^{0.71}$$

Donde:

- τ = Esfuerzo cortante, (kPa)
 G^* = Módulo complejo esperado, (kPa)

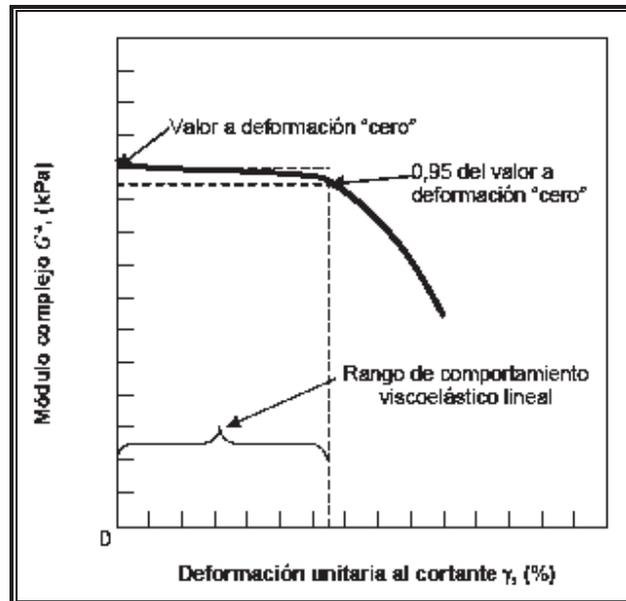
3.10.7 Procedimiento de la prueba

- 1) Una vez que el equipo y la muestra han sido preparados como se indica anteriormente, se calienta la muestra utilizando la cámara ambiental, hasta alcanzar la temperatura de prueba. Se fija el controlador de temperatura al nivel de prueba deseado, incluyendo, en su caso, los ajustes necesarios. La prueba se iniciará cuando se haya mantenido la temperatura de prueba en un rango de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ por al menos 10 min.
- 2) Una vez alcanzada la temperatura de prueba como se indica en la Fracción anterior, se aplican a la muestra 10 ciclos de una deformación o esfuerzo cíclico de valor predeterminado, a una frecuencia de 10 rad/s. Hecho lo anterior, se aplican otros 10 ciclos en las mismas condiciones y se registran las lecturas correspondientes. Es importante que se inicie la segunda fase de la prueba lo más pronto posible después de terminada la primera. Cuando se efectúen pruebas a diferentes temperaturas con la misma muestra, éstas se harán de tal forma que el tiempo entre prueba y prueba sea mínimo, con objeto de evitar el endurecimiento de la muestra por efecto de las asociaciones moleculares, lo que puede provocar el incremento del valor del módulo complejo; el tiempo total de prueba no será mayor de 4 h.
- 3) Con las lecturas registradas automáticamente, mediante el sistema de control y registro de datos del reómetro, al procesarlas el aparato obtiene el módulo complejo (G^*) y el ángulo fase (δ). Se pueden efectuar varias mediciones con la misma muestra para verificar que haya sido preparada adecuadamente, pero teniendo cuidado que no se desprege la muestra de los platos o se fracture, ya que esto provocaría que disminuya el valor del módulo complejo. Algunos cementos asfálticos muestran una disminución del módulo complejo al practicárseles pruebas múltiples. Es importante que si se efectúan pruebas utilizando más de una frecuencia, se inicie con la más baja hasta llegar a la más alta.

3.10.8 Cálculos y resultados

- 1) Se calcula el módulo reológico de corte dinámico, dividiendo el módulo complejo entre el seno del ángulo fase ($G^*/\sin \delta$), obtenidos de las lecturas proporcionadas por el sistema de control y registro de datos del reómetro.
- 2) Se reporta como resultado de esta prueba, el valor del módulo reológico de corte dinámico en kPa y el ángulo fase (δ) en grados ($^\circ$), ambos con aproximación de un décimo.
- 3) Tanto para cementos asfálticos sin modificar como modificados, el módulo complejo (G^*) y el ángulo fase (δ), decrecen con el aumento del esfuerzo cortante. Se puede obtener una gráfica como la que se muestra en la Figura 3.23, incrementando gradualmente el valor del esfuerzo o la amplitud de la deformación. Aunque no es necesario elaborar gráficas como esta durante la prueba, son de utilidad para obtener los límites de la región en que el cemento asfáltico muestra un comportamiento viscoelástico lineal, que se observa en los valores pequeños de deformación, donde el módulo complejo es relativamente independiente de la deformación por cortante, es decir, que el valor del módulo complejo varía entre el 95 y el 100% del valor correspondiente a una deformación “cero”.
- 4) La extensión de esta región de comportamiento lineal varía con la magnitud del módulo complejo.
- 5) El esfuerzo por cortante varía desde cero en el centro de los platos, hasta un valor máximo en su perímetro y es calculado a partir del esfuerzo de torsión, aplicado o medido, o de la deformación, aplicada o medida y de la geometría del espécimen de prueba.
- 6) Además del resultado de la prueba, en el reporte se incluye:
 - a) El módulo complejo obtenido de las lecturas proporcionadas por el sistema de control y registro de datos del reómetro, en kPa, con aproximación de un milésimo.
 - b) El diámetro de los platos utilizados en mm con aproximación de un décimo y la separación entre platos con aproximación de un $1 \mu\text{m}$.

Figura 3. 20 .- Ejemplo de una gráfica para definir los límites del comportamiento viscoelástico lineal de un cemento asfáltico



- c) La temperatura de prueba en °C con aproximación de un décimo.
- d) La frecuencia de prueba en rad/s, con aproximación de un décimo.
- e) La amplitud de la deformación unitaria en %, con aproximación de un centésimo, o el esfuerzo de torsión en mN·m con aproximación a la unidad.
- f) La descripción completa del material probado incluyendo su código de identificación, tipo de recipiente de almacenaje y origen, entre otros.
- g) La descripción general del equipo utilizado, especificando si es un reómetro de esfuerzo constante o de deformación constante e incluyendo modelo, tipo de cámara ambiental y demás información relevante para la descripción del aparato.
- h) Los valores de deformación o de esfuerzo que se hayan utilizado, para determinar que la prueba se ha desarrollado dentro de la región lineal.
- i) En caso que se observe que la prueba se ha realizado en el rango de comportamiento viscoelástico no lineal, se reportará el módulo complejo correspondiente a la deformación o al esfuerzo utilizados, indicando en el reporte que las condiciones de prueba estuvieron fuera de la región lineal.

3.10.9 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de prueba.
2. Verificar que el equipo esté calibrado de acuerdo con las instrucciones del fabricante.
3. Que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al hacer la prueba la muestra no se mezcle con agentes extraños y se altere el resultado.
4. Verificar que siempre se fluidifique totalmente la muestra antes de montarla entre los platos, ya que la estructura que se desarrolla durante su almacenaje puede provocar que se sobrestime su módulo complejo hasta en un 50%.
5. Cuidar que el recorte de la muestra al montarla entre los platos se haga con la mayor exactitud posible, ya que una pequeña variación en el diámetro de la muestra puede alterar significativamente el resultado de la prueba.
6. Cuidar que cuando se vayan a realizar pruebas a distintas temperaturas con la misma muestra, el tiempo total de prueba no sea mayor de 4 h, para que los valores obtenidos sean confiables.
7. Cuidar que cuando se vayan a realizar mediciones múltiples a la misma muestra, no se despegue dicha muestra de los platos o se fracture, para que los valores obtenidos sean confiables.

3.11 RECUPERACIÓN ELÁSTICA EN DUCTILÓMETRO

3.11.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la recuperación elástica del residuo de la prueba de película delgada y de los residuos asfálticos obtenidos por destilación de emulsiones. La prueba consiste en mantener una muestra de prueba estirada en un ductilómetro durante un tiempo determinado, después del cual se corta por la mitad, se deja reposar y finalmente se observa cuánto se recupera la deformación.

3.11.2 Equipo y materiales

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

3.11.2.1 Ductilómetro

Como el mostrado en la Figura 3.24, constituido fundamentalmente por un dispositivo para estirar la briqueta de material asfáltico a una velocidad uniforme y sin vibraciones perjudiciales, de tal manera que durante la prueba la muestra permanezca sumergida en el agua de un tanque de material resistente a la corrosión, ubicada a no menos de 2,5 cm tanto del nivel del agua como del fondo del tanque.

3.11.2.2 Molde para elaborar la briqueta

De latón, compuesto por dos mordazas y dos elementos laterales, con la forma y dimensiones mostradas en la Figura 3.25.

3.11.2.3 Placa de apoyo

Plana, lisa y rígida, de latón o bronce, con superficie de 15×5 cm como mínimo y espesor de 2 mm aproximadamente.

Figura 3. 21 .- Ductilómetro

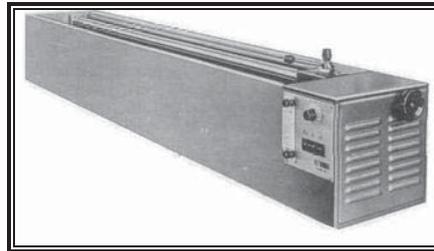
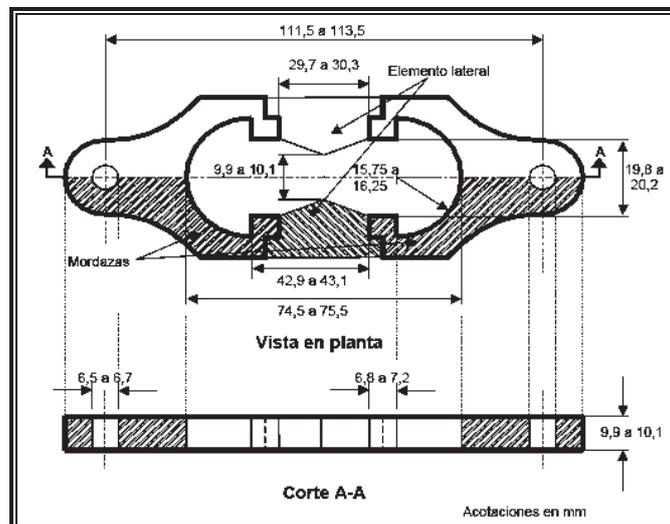


Figura 3. 22 .- Molde para elaborar la briqueta



3.11.2.4 Baño de agua

Que permita mantener la temperatura a $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, con una capacidad mínima de 10 L. Estará provisto de un entrepaño con perforaciones para colocar la muestra sumergida, ubicado a no menos de 5 cm del fondo del baño y 10 cm de la superficie libre del líquido.

3.11.2.5 Termómetro

Con rango de -8 a 32°C y aproximación de $0,1^{\circ}\text{C}$.

3.11.2.6 Malla n°50

De $300 \mu\text{m}$ de abertura.

3.11.2.7 Espátula de níquel

De borde recto y 20 cm de longitud.

3.11.2.8 Cloruro de sodio

De uso comercial.

3.11.2.9 Antiadherente

Aceite o grasa de silicón; una mezcla de glicerina y dextrina; talco o caolín, para recubrir la placa de apoyo y los elementos laterales, con lo que se evita su adherencia con el asfalto.

3.11.2.10 Paño

Para aplicar el antiadherente en la placa de apoyo y en los elementos laterales.

3.11.3 Preparación de la muestra

Previamente a la preparación de la muestra, se aplica con el paño el antiadherente seleccionado en los dos elementos laterales del molde de la briqueta y en la superficie de la placa de apoyo, para evitar que se les adhiera el material asfáltico. Hecho lo anterior se coloca el molde sobre la placa de apoyo y se ajusta dejándolo en posición horizontal.

La muestra de prueba, según se trate del residuo de la prueba de película delgada de cementos asfálticos modificados o del residuo asfáltico obtenido por destilación de una emulsión modificada, se prepara como se indica a continuación:

3.11.3.1 Muestra del residuo de la prueba de película delgada de cementos asfálticos modificados

Del residuo de la prueba de película delgada, se toma un volumen ligeramente mayor al necesario para llenar el molde de la briqueta y se calienta en un recipiente apropiado, agitándolo en forma continua con el objeto de distribuir la temperatura uniformemente, hasta

que adquiriera la fluidez suficiente para facilitar su vaciado en el molde, cuidando que durante su calentamiento la temperatura no exceda de 130°C y que la operación se realice en un lapso menor de 30 min. Hecho esto, inmediatamente se llena el molde previamente preparado como se indica, para hacer la briqueta, pasando la muestra de prueba por la malla N°50, agitándola perfectamente y vertiéndola cuidadosamente, mediante un chorro delgado que se mueve a lo largo del molde, hasta rebasar ligeramente el nivel de enrase, evitando la formación de burbujas de aire. Finalmente se cubre la briqueta adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar durante 30 a 40 min. hasta que alcance la temperatura ambiente.

3.11.3.2 muestra del residuo por destilación de una emulsión asfáltica modificada

Inmediatamente después de obtener el residuo por destilación de la emulsión asfáltica, se destapa el alambique utilizado en esa prueba, se homogeneiza su contenido con la espátula y se elabora una briqueta llenando el molde previamente preparado como se indica, haciendo pasar la muestra de prueba por la malla N°50, agitándola perfectamente y vertiéndola cuidadosamente mediante un chorro delgado que se mueve a lo largo del molde, hasta rebasar ligeramente el nivel de enrase, evitando la formación de burbujas de aire. Finalmente se cubre adecuadamente la briqueta para protegerla del polvo y se deja enfriar durante 30 a 40 min. hasta que alcance la temperatura ambiente.

3.11.4 Procedimiento De La Prueba

- 1) Una vez enfriado el molde que contiene la briqueta, se coloca dentro del baño de agua, a una temperatura de $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, durante 30 min.; se saca del baño y se enrasa la briqueta cortando el exceso de material con una espátula de borde recto previamente calentada para facilitar el corte. Se vuelve a introducir en el baño a la misma temperatura durante 90 ± 5 min.
- 2) A continuación se quitan los elementos laterales del molde y se retira la briqueta de la placa. De inmediato se instala con sus mordazas en el ductilómetro previamente preparado con agua a $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$, sujetando los extremos de éstas en los postes o ganchos del aparato, debiendo quedar sumergida con su cara superior a no menos de 2,5 cm de la superficie. Durante la prueba se mantendrá el agua a la temperatura indicada.

- 3) Se pone en marcha el mecanismo de prueba a una velocidad de 5 cm/min., con una variación de $\pm 5\%$, hasta que la briqueta se haya deformado 20 cm, momento en el cual se detiene el mecanismo y se mantiene al espécimen en esta posición durante 5 min. Se procede enseguida a cortar por el centro al espécimen con unas tijeras, permitiéndole permanecer intacto en el ductilómetro por 1 h. Al final del periodo, se desliga el mecanismo del ductilómetro y se regresa la mitad del espécimen hasta que los extremos cortados se toquen; en este momento se lee el desplazamiento de la mordaza y se registra en cm.

3.11.5 Cálculos y resultados

Se reporta como recuperación elástica, el porcentaje de deformación recuperado respecto a la deformación total, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{20 - x}{20} \times 100$$

Donde:

R = Recuperación elástica en ductilómetro, (%)

x = Lectura del desplazamiento de la mordaza al unir los extremos cortados del espécimen, (cm)

3.11.6 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

- 1) Realizar la prueba bajo las condiciones de temperatura que se indican.
- 2) Evitar que durante el llenado del molde de la briqueta se generen burbujas de aire en la superficie o en el interior de la muestra de prueba.
- 3) Procurar que al estirar la briqueta ésta no toque el fondo del tanque del ductilómetro o la superficie del agua, de lo contrario, se repetirá la prueba agregándole cloruro de sodio al agua del tanque para aumentar su densidad o alcohol metílico para disminuirla y lograr que la briqueta al ser estirada se mantenga en posición sensiblemente horizontal.

3.12 SEPARACIÓN EN CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO

3.12.1 Objetivo de la prueba

La prueba consiste en comparar el punto de reblandecimiento (anillo y esfera) en las partes superior e inferior en las muestras tomadas de un tubo con asfalto modificado con polímero y sellado.

3.12.2 Material y equipo

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

3.12.2.1 tubos

De aluminio, de 2,5 cm de diámetro por 14 cm de longitud, cerrados en uno de sus extremos.

3.12.2.2 Horno

Provisto de termostato, capaz de mantener una temperatura constante de $163 \pm 6^\circ\text{C}$.

3.12.2.3 Cámara refrigerante

Capaz de mantener una temperatura constante de $-7 \pm 1^\circ\text{C}$.

3.12.2.4 Soporte

Capaz de sujetar en posición vertical a los tubos de aluminio en el horno así como en la cámara refrigerante.

3.12.2.5 Espátula

Rígida y filosa para cortar el tubo que contiene la muestra.

3.12.2.6 Martillo

Para ayudar a cortar el tubo que contiene la muestra con la espátula.

3.12.2.7 Malla n°50

De 300 μm de abertura. Para cuando se prueben residuos por destilación de emulsiones asfálticas.

3.12.3 Preparación de la muestra

La muestra de cemento asfáltico modificado se prepara de la siguiente manera:

3.12.3.1 La prueba se realizará por duplicado, por lo que será necesario preparar dos muestras de prueba.

3.12.3.2 De la muestra se toma una porción de 50 g y se calienta en un recipiente apropiado, agitándola en forma continua para distribuir la temperatura uniformemente, hasta que adquiera la fluidez que permita su vaciado en el tubo de aluminio previamente fijado verticalmente en el soporte.

3.12.3.3 Se vacía la muestra de prueba en el tubo cuidando que durante su calentamiento y vaciado no se formen burbujas de aire, que la temperatura alcanzada no exceda 130°C y que esta operación se realice en un lapso menor de 60 min. Se retira el exceso de material en el tubo y se sella. Cuando se trate de residuos por destilación de emulsiones asfálticas, el vaciado se hará a través de la malla N°50.

3.12.4 Procedimiento de la prueba

a) Se coloca el soporte con el tubo en el horno cuando éste mantenga una temperatura de $163 \pm 6^{\circ}\text{C}$ y se conserva el tubo ahí durante un período de 48 ± 1 h. Transcurrido el período, se retiran del horno el soporte con el tubo e inmediatamente se colocan en la cámara refrigerante cuando ésta mantenga una temperatura de $-7 \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 4 h como mínimo, para solidificar la muestra. Durante todo el proceso de la prueba el tubo se mantendrá en

posición vertical y libre de vibraciones.

b) Una vez cumplido el periodo de refrigeración, el tubo se coloca en una superficie firme y plana; con la ayuda de la espátula y el martillo, se corta la muestra en el sentido transversal en tres partes iguales y se colocan los extremos en el horno a $163 \pm 6^\circ\text{C}$, hasta que el material asfáltico esté lo suficientemente fluido.

c) Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos, se vierten ambas muestras, una en cada anillo y se obtienen, simultáneamente, sus puntos de reblandecimiento. Es importante identificar ambos anillos para saber cuál corresponde a la muestra de la parte superior del tubo y cuál a la parte inferior.

d) Se registra para cada anillo la temperatura en el momento en que el material asfáltico toque la placa inferior del soporte, con aproximación de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

e) Se realiza la prueba en la muestra del segundo tubo siguiendo el procedimiento establecido en esta Cláusula.

3.12.5 Cálculos y resultados

Se reporta como la separación (diferencia en la temperatura anillo y esfera), con aproximación de $0,5^\circ\text{C}$, el resultado obtenido mediante la siguiente expresión, indicando el líquido utilizado para la prueba.

$$D = T_s - T_i$$

Donde:

D = Separación (diferencia en la temperatura anillo y esfera), ($^\circ\text{C}$)

T_s = Promedio de las dos temperaturas correspondientes al punto de reblandecimiento de la parte superior de los tubos, ($^\circ\text{C}$)

T_i = Promedio de las dos temperaturas correspondientes al punto de reblandecimiento de la parte inferior los tubos, ($^\circ\text{C}$)

Para que el resultado se considere satisfactorio, la diferencia entre las mediciones de ambas pruebas, es decir, entre los dos valores de T_s o de T_i , no será mayor de 2°C .

3.12.6 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

- Realizar la prueba bajo las condiciones de temperatura, masa y tiempo.
- Confirmar que el equipo esté perfectamente limpio y calibrado al momento de realizar la prueba.
- Verificar que no se presente ningún tipo de vibración que altere los resultados de la prueba.

3.13 RESILIENCIA EN CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO

3.13.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite conocer la resiliencia en materiales asfálticos modificados sometiendo un espécimen a una prueba de penetración, con el fin de predecir el comportamiento futuro del asfalto.

3.13.2 Equipo y materiales

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

3.13.2.1 Aparato de penetración o penetrómetro para asfaltos

Estándar, como el mostrado en la Figura 3.26, capaz de sujetar una esfera como la referida y provisto de un dispositivo para medir la profundidad de penetración de la esfera, en décimos de milímetro. También contará con un mecanismo que permita aproximar la esfera a la muestra de prueba.

3.13.2.2 Esfera de penetración

De acero inoxidable, totalmente endurecida y perfectamente pulida, con la forma y dimensiones que se muestran en la Figura 3.27, que se acople al penetrómetro. La guía tendrá una masa de $27,5 \pm 0,1$ g y la masa total de la guía con la esfera será de $75 \pm 0,01$ g.

3.13.2.3. Cápsula

De metal o de vidrio refractario, de forma cilíndrica, con el fondo plano, con diámetro interior de 55 mm y altura interior de 45 mm, aproximadamente.

Figura 3. 23 .- Penetrómetro

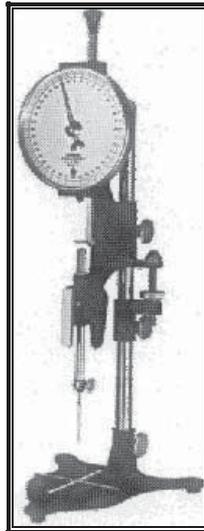
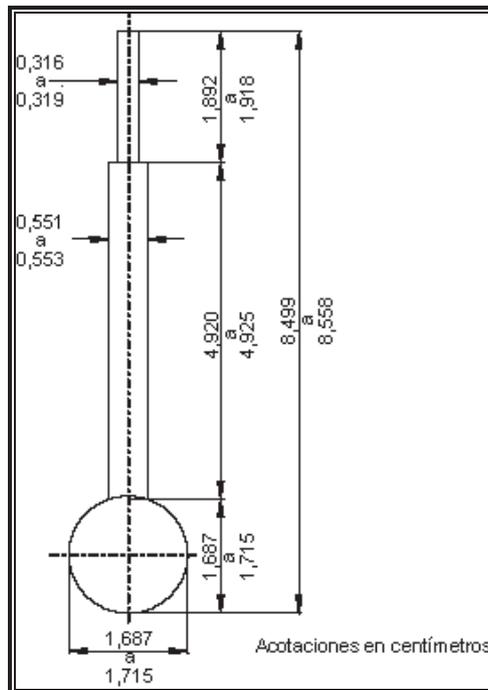


Figura 3. 24 .- Esfera de penetración



3.13.2.4 Baño de agua

Con temperatura controlable hasta 50°C, con dimensiones y características tales que le den una capacidad mínima de 10 L. Provisto de un entrepaño con perforaciones, colocado a no menos de 5 cm del fondo del baño y a no menos de 10 cm de la superficie libre del líquido.

3.13.2.5 Termómetro

Con rango de 19 a 65°C y aproximación de 0,1°C.

3.13.2.6 Cronómetro

Con aproximación de 0,2 s.

3.13.2.7 Recipiente de manejo

De metal, plástico o vidrio, de forma cilíndrica adecuada para manejar y mantener sumergida la cápsula que contenga la muestra de prueba; de 350 cm³ de capacidad y con un dispositivo que permita fijar convenientemente la cápsula.

3.13.2.8 Horno

Provisto de termostato que mantenga temperaturas hasta de 175°C, con aproximación de $\pm 2^\circ\text{C}$.

3.13.2.9 Agua

Destilada.

3.13.2.10 Glicerina o talco

Para evitar que se adhiera el material asfáltico a la esfera.

3.13.3 Preparación de la muestra

Se toma una porción de $177,5 \text{ cm}^3$ y se calienta en un recipiente apropiado, agitándola en forma continua con el objeto de distribuir la temperatura uniformemente, hasta que adquiera la fluidez suficiente para facilitar su vaciado en la cápsula, cuidando que durante su calentamiento no se formen burbujas de aire, que la temperatura alcanzada no exceda de 130°C y que esta operación se realice en un lapso menor de 30 min. Hecho esto, inmediatamente se llena la cápsula con la muestra de prueba, se cubre adecuadamente para protegerla del polvo, se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente, para después ser sometida a un proceso de curado durante 24 h bajo condiciones estándar de laboratorio.

3.13.4 Procedimiento de la prueba

- a) Se coloca la cápsula que contiene la muestra de prueba dentro del recipiente de manejo, para introducirlos posteriormente en el baño de agua, cuando éste mantenga una temperatura de $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Se sumerge dicho recipiente completamente y se mantiene así por espacio de 1 h, con objeto de que el producto asfáltico adquiera esa temperatura.
- b) Se coloca el penetrómetro sobre una superficie plana, firme y sensiblemente horizontal, se le acopla la esfera de penetración con guía y se nivela perfectamente el penetrómetro.
- c) Se saca del baño de agua el recipiente de manejo, el cual contiene la muestra de prueba en su cápsula, cuidando que tenga agua suficiente para cubrir completamente dicha cápsula. Se colocan el recipiente y la cápsula sobre la base del penetrómetro, de tal manera que la muestra quede bajo la esfera de penetración, a la que previamente se le habrá aplicado ligeramente glicerina o talco para evitar que se adhiera a la muestra. Se ajusta la altura de la esfera de penetración hasta que haga contacto con la superficie de la muestra, lo que se logra haciendo coincidir la superficie de la esfera con su imagen reflejada en la superficie de la muestra.
- d) Se hace coincidir la manecilla del penetrómetro con el cero de su carátula, hecho esto se libera la esfera dejándola penetrar durante 5 s, después de lo cual se toma la lectura registrándola en décimos de milímetro como P.

- e) Sin alterar la lectura del medidor, se presiona la guía con la esfera a un ritmo uniforme durante 10 s, hasta que la manecilla del penetrómetro recorra 100 unidades, es decir, que la manecilla indique $P + 100$. Se sostiene esta presión mediante el embrague durante otros 5 s, mientras se regresa la manecilla del penetrómetro a “cero”. Hecho lo anterior, se libera el embrague para que el espécimen se recupere durante 20 s y se registra la lectura después de la recuperación, como F , en décimos de milímetro.
- f) Se realizan un total de tres determinaciones sobre puntos equidistantes entre ellos, separados de la pared de la cápsula no menos de 13 mm. Se limpia cuidadosamente la esfera después de cada determinación sin desmontarla y, de ser necesario, para ajustar la temperatura a $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$, se regresa el recipiente de manejo con la muestra al baño de agua. Para la limpieza de la esfera se utiliza un paño humedecido con tricloroetileno y después un paño seco y limpio.

3.13.5 Cálculos y resultados

Se calcula la recuperación elástica para cada una de las tres mediciones, utilizando la siguiente fórmula:

$$R = P + 100 - F$$

Donde:

- R = Recuperación elástica, (%)
 P = Penetración de la esfera, (1×10^{-1} mm)
 F = Lectura de recuperación, (1×10^{-1} mm)

Se reporta como la resiliencia, el promedio de las tres recuperaciones elásticas calculadas.

3.13.6 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

- a) Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de prueba.
- b) Realizar la prueba bajo las condiciones de temperatura, masa y tiempo de penetración que se especifican.
- c) Evitar que exista aire atrapado en la muestra de prueba.
- d) Confirmar que la esfera esté perfectamente limpia en el momento de la penetración.
- e) Verificar que la esfera esté en contacto con la superficie de la muestra de prueba al iniciar la penetración.

3.14 RECUPERACIÓN ELÁSTICA POR TORSIÓN EN CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO

3.14.1 Objetivo de la prueba

Esta prueba permite determinar la capacidad de recuperación elástica de los materiales asfálticos modificados. La prueba consiste en inducir una deformación angular mediante un cilindro de acero de dimensiones específicas, embebido en una muestra de cemento asfáltico modificado, con el objeto de observar su capacidad de recuperación.

3.14.2 Equipo y materiales

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

3.14.2.1 Aparato de torsión

Para imponer una deformación angular a la muestra, con la forma y dimensiones

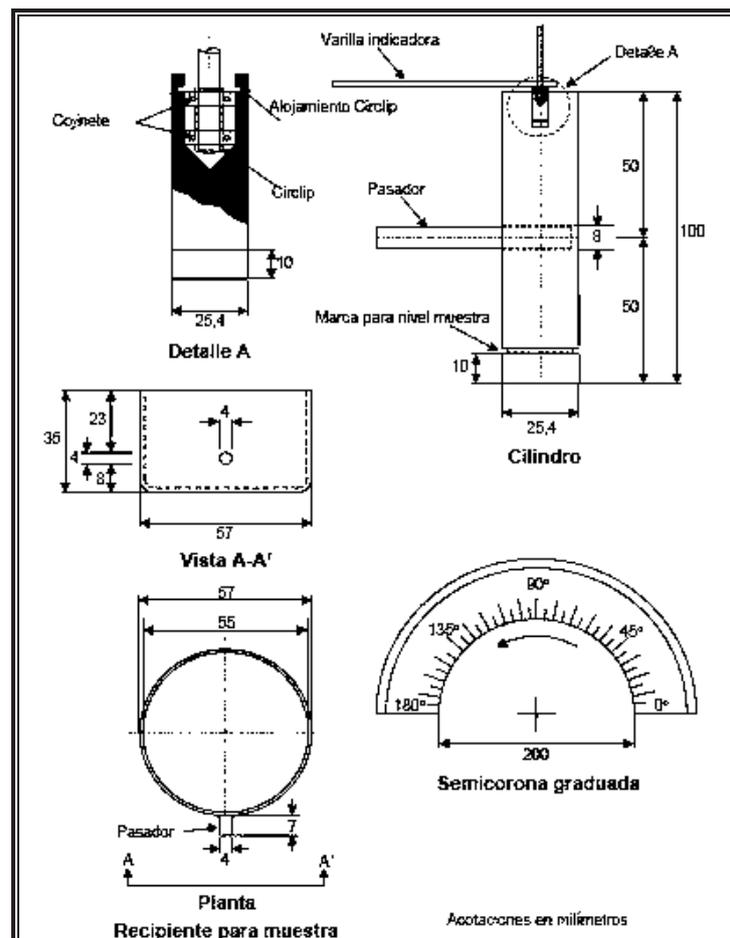
mostradas en las Figuras 3.28 y 3.29 y constituido fundamentalmente por:

- Cilindro metálico
- Semicorona con escala graduada de 0 a 180°
- Barra indicadora, que permite tomar la medición sobre la semicorona graduada
- Baño de agua
- Molde para la muestra

3.14.2.2 Termómetro

Con rango de 19 a 27°C y aproximación de 0,1°C.

Figura 3. 25 .- Cilindro, semicorona graduada y molde para la muestra



3.14.2.3 Cronómetro

Con aproximación de 1 s.

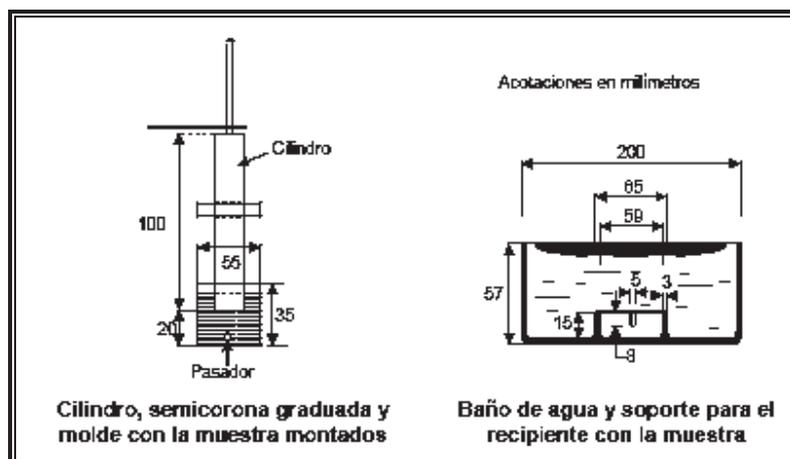
3.14.2.4 Estufa

Para calentar la muestra de prueba.

3.14.2.5 Varilla

Para agitado, con extremos redondeados con diámetro de 13 mm aproximadamente.

Figura 3. 26 .- Recipiente con la muestra y baño de agua



3.14.2.6 ESPÁTULA

Metálica, para agitar la muestra.

3.14.2.7 RECIPIENTE

De un material resistente al calor.

3.14.2.8 MALLA N°50

De 300 μm de abertura.

3.14.3 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

De la muestra de cemento asfáltico modificado, se toma una porción de volumen ligeramente mayor al necesario para llenar el molde para la muestra del aparato de torsión y se calienta en un recipiente apropiado, agitándola en forma continua con el objeto de distribuir la temperatura uniformemente, hasta que adquiera la fluidez suficiente para facilitar su vaciado en dicho molde, cuidando que durante su calentamiento la temperatura no exceda de 130°C y que esta operación se realice en un lapso menor de 30 min.

3.14.4 Procedimiento de la prueba

- a) Se centra y fija el molde para la muestra dentro del baño, antes de agregar el agua.
- b) Se ajusta el cilindro metálico de tal forma que su base inferior quede a una distancia de 20 mm del fondo del molde, previamente al vertido de la muestra.
- c) Una vez preparada la muestra, se vierte en el molde, agitándola perfectamente y haciéndola pasar cuidadosamente a través de la malla N°50, formando un chorro delgado que se mueva por toda la circunferencia del molde, evitando la formación de burbujas de aire y en cantidad suficiente que permita el enrasamiento de dicho molde usando como referencia la marca grabada sobre el cilindro metálico a 10 mm de su base inferior, es decir, que el cilindro metálico quede sumergido dentro de la muestra precisamente estos 10 mm.
- d) Se deja enfriar el conjunto formado por el molde, la muestra y el cilindro metálico, durante 1 h como mínimo, hasta alcanzar la temperatura ambiente.
- e) Se hace circular agua por el baño a una temperatura de $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$ durante al menos 90 min., con el fin de equilibrar la temperatura del agua y de la muestra de prueba. El nivel del líquido en el baño estará por encima del recipiente con la muestra.
- f) Se introduce el pasador en el espacio que para tal efecto tiene el cilindro metálico y con su ayuda se hace girar dicho cilindro 180° en el sentido de las manecillas del reloj, es decir, se lleva la barra indicadora de 180° a 0° , en un tiempo comprendido entre 3 y 5 s. Hecho esto, se retira inmediatamente el pasador para que no interfiera con el desarrollo posterior de la prueba.
- g) Transcurridos 30 min. \pm 15 s, se registra la lectura indicada por la barra sobre la

semicorona graduada, como el valor del ángulo recuperado (L).

3.14.5 Cálculos y resultados

Se reporta como resultado de la prueba, el porcentaje de recuperación con respecto al ángulo inicial de 180°, utilizando la siguiente expresión:

$$R_e = \frac{L}{180} \times 100$$

Donde:

$$R_e = \frac{\text{Recuperación elástica por torsión, (\%)}}{\text{Ángulo recuperado, (°)}}$$

3.14.6 Precauciones para evitar errores

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observan las siguientes precauciones:

- Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de prueba.
- Realizar la prueba bajo las condiciones de temperatura y tiempo señalados.
- Evitar que exista aire atrapado en la muestra de prueba.
- Confirmar que el equipo esté perfectamente limpio en el momento de la prueba, especialmente el cilindro metálico.

CAPÍTULO 4.- MÉTODO UCL® (MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES)

Debido a los buenos resultados que ha generado y a la sencillez para llevarlo a cabo, se ha decidido utilizar el método UCL® para valorar la adhesividad del pétreo con un asfalto convencional (tipo AC-20) modificado con polímero (ELVALOY®).

El método UCL® desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña, por el Dr. Félix Edmundo Pérez Jiménez y su grupo de trabajo, basado en la aplicación del ensayo Cántabro de pérdida por desgaste, constituye un procedimiento de caracterización basado en la medida de la cohesión y en como varía esta propiedad con la temperatura, la acción del agua o el envejecimiento, esto es, permite valorar el ligante funcionalmente de acuerdo con su comportamiento. En este estudio se pretende mostrar la sensibilidad del método para diferenciar y valorar el comportamiento de los ligantes de similares características, y mostrar las diferencias en cuanto a comportamiento de diferentes pétreos.

En el método UCL® se valora la adhesividad y la cohesión a partir de la resistencia a la abrasión de una mezcla de referencia con características definidas, variando la temperatura de ensayo de las probetas.

El ensayo consiste en introducir en la máquina de Los Ángeles, una probeta tipo Marshall fabricada con una granulometría especial (sin finos), para la cual será necesario utilizar una misma granulometría para la realización de todas las probetas, con un 80% de material pétreo comprendido entre la malla No.4 y la malla No10, y un 20% de material pétreo comprendido entre la malla No.10 y la malla No.30, y un contenido de asfalto definido (4.5%) y someterla al ensayo sin colocar en la máquina ninguna carga abrasiva (esferas).

Durante el ensayo se van desprendiendo por impacto y abrasión los áridos más superficiales de la probeta, determinándose, tras cumplirse 300 revoluciones, la pérdida de peso de la probeta referida, en tanto por ciento del peso inicial, de acuerdo con la ecuación:

$$P_d = \left[\frac{(P_i - P_f)}{P_i} \right] * 100$$

Dónde: P_d = Pérdidas por Desgaste (%)

P_i = Peso inicial (gr.)

P_f = Peso final (gr.).

Las vueltas en la máquina de Los Ángeles dan lugar a un proceso de deterioro en las probetas, similar al que hacen las cargas del tráfico en los pavimentos, en la figura 4.1 se observa la máquina para el ensayo de la prueba de Los Ángeles y diferentes probetas ensayadas con el método UCL®.

Figura 4. 1 .- Máquina de los ángeles.



Una parte de la energía que se genera en cada impacto es absorbida por la deformación elástica del material, otra parte se elimina con las deformaciones plásticas y el resto que no pueden eliminar las probetas es la que causa la disgregación.

Este ensayo nos da una idea clara sobre la capacidad de las características de adhesividad y cohesión en las mezclas dado que, si las uniones son dúctiles y tenaces, las pérdidas por desgaste y abrasión en las probetas son bajas, y cuando resultan frágiles o poco consistentes, las pérdidas se incrementan.

En este trabajo se analizaron tres factores que influyen directamente en el comportamiento de las mezclas asfálticas, la temperatura, el efecto del agua y el efecto de envejecimiento.

Las probetas serán probadas en cinco condiciones diferentes de temperatura las cuales van desde $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-10, 5, 20, 40$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) de la siguiente manera:

4.1 Análisis por temperatura

1. Las probetas serán introducidas en un horno eléctrico como el mostrado en la figura 4.2, durante un tiempo de 2hr. Para que estas alcancen la temperatura deseada para su ensayo.

Figura 4. 2 .- Horno eléctrico



2. Ya que las probetas tienen la temperatura deseada se pesan en una báscula analítica y así obtener el peso inicial (P_i).
3. A continuación se introduce en la máquina de los Ángeles mostrada en la figura 4.1, y se ensaya ahí hasta cumplir 300 revoluciones.

4. Después se saca de la máquina de los Ángeles la fracción que quedo de la probeta debido al desgaste producido por la prueba, se pesa en la báscula analítica y se obtiene el peso final.

4.2 Análisis por efecto del agua

Para realizar el análisis por efecto del agua, se deben de introducir las probetas en un baño marshall, como el mostrado en la figura, durante un tiempo de 24 hr, a una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, ya que están preparadas las muestras se realiza el mismo procedimiento descrito a continuación:

1. Las probetas serán introducidas en un horno eléctrico como el mostrado en la figura, durante un tiempo de 2hr. Para que estas alcancen la temperatura deseada para su ensayo.
2. Ya que las probetas tienen la temperatura deseada se pesan en una báscula analítica y así obtener el peso inicial (P_i).
3. A continuación se introduce en la máquina de los Ángeles mostrada en la figura 4.1, y se ensaya ahí hasta cumplir 300 revoluciones.
4. Después se saca de la máquina de los Ángeles la fracción que quedo de la probeta debido al desgaste producido por la prueba, se pesa en la báscula analítica y se obtiene el peso final.

4.3 Análisis por envejecimiento

El procedimiento de envejecimiento de las probetas se llevará a cabo en un tiempo de 32 hr teniendo probetas envejecidas a las 2, 4, 8, 16 y 32 hr, por lo que se envejecerán 15 probetas, tres para cada uno de los rangos de tiempo de envejecimiento.

1. Las probetas deben de cubrir con una malla rígida de acero para evitar la deformación de las probetas, porque estas serán introducidas a temperaturas muy altas en un horno eléctrico.
2. Ya cubiertas las probetas, se introducen en el horno eléctrico a una temperatura de $163\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$.

3. Las probetas se irán sacando de acuerdo al nivel de envejecimiento requerido, se sacarán tres probetas cada que se llegue el tiempo de envejecimiento deseado (2, 4, 8, 16 y 32 hr).
4. Se recomienda estar volteando las probetas cada 2 hr, ya que se encuentra a una temperatura muy alta y el asfalto se vuelve líquido, y así evitar la pérdida del asfalto.
5. Después de que las probetas sean sacadas del horno eléctrico se desmontan de las malla.
6. Ya que las probetas se encuentran envejecidas, se prueban a temperatura ambiente en la máquina de los Ángeles, obteniendo los pesos respectivos para obtener los resultados del análisis.

CAPÍTULO 5.- FASE EXPERIMENTAL

5.1 Materiales

1. MATERIAL PÉTREO.

Para el presente trabajo de investigación se utilizó un material pétreo de una granulometría de 3/8", procedente del banco de materiales ubicado en Cuto del Porvenir, municipio de Tarimbaro, Mich.

2. MATERIAL ASFÁLTICO.

Para la realización de las probetas se usó un cemento asfáltico del tipo AC-20 modificado con ELVALOY® marca DuPont®, procedente de Asfaltos Guadalajara S.A. de C.V. ubicada en Guadalajara Jalisco.

5.2 Fase experimental

5.2.1 Muestreo de materiales

El Método UCL® (Método Universal de Caracterización de Ligantes), requiere de una granulometría especial, por lo que se prosiguió de la siguiente manera:

- a) El material pétreo fue cribado y lavado, haciéndolo pasar por la malla N° 4, la malla N° 10 y la malla N° 30. Se aprovecho todo el material que fue retenido en la malla N° 10 y la malla N° 30 y lo demás fue desechado.

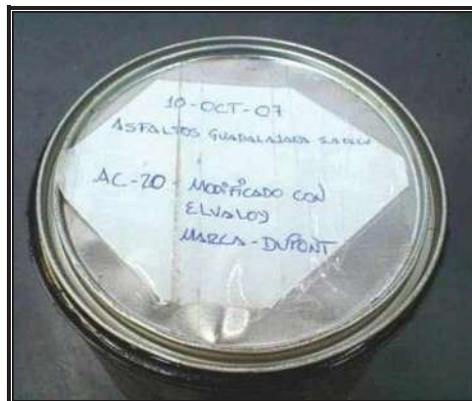
Figura 5. 1 Material lavado (retenido en malla #30)



- b) A continuación el material fue lavado y secado, dejándolo libre de todo contaminante para que los resultados no se vieran afectados.
- c) Ya obtenida la granulometría requerida se procedió a preparar las muestras de material pétreo para la fabricación de las probetas de ensayo, para esta investigación se utilizaron muestras que pesan 1 Kg., y como se indica en la descripción del Método UCL® (Método Universal de Caracterización de Ligantes), se utilizó un 80% (800g) de material retenido en la malla N° 10 y un 20% (200g) del material retenido en la malla N° 30.

Por otra parte se utilizó un asfalto modificado con ELVALOY® marca DuPont mostrado en la figura 5.2 procedente de Asfaltos Guadalajara S.A. de C.V., como la cantidad de asfalto es un porcentaje de el material petreo (4.5%) se utilizaron aproximadamente 45gr por probeta dando un total aproximado de 2.7 kg

Figura 5. 2 Asfalto Modificado



5.2.2 Fabricación de probetas

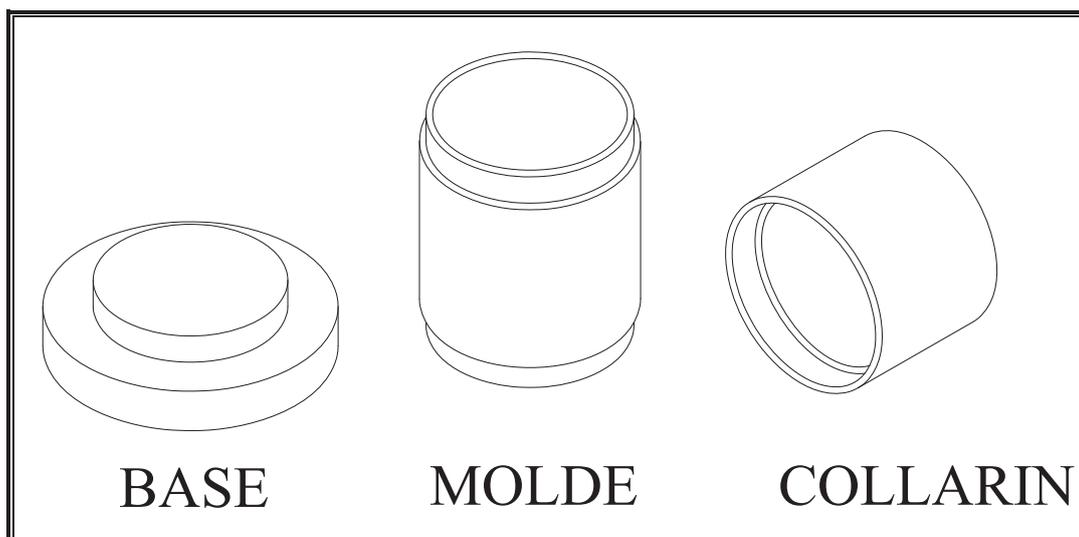
Para este trabajo de investigación se fabricarán 51 probetas, las cuales se utilizarán para cada uno de los parámetros que se van a analizar (18 por temperatura, 18 por efecto del agua y 15 por envejecimiento).

Como se observa se agregaron tres probetas a las pruebas de Temperatura y tres más a la prueba de efecto de del agua, esto fue por la razón de que se trabajó con un asfalto modificado con polímero y las propiedades de resistencia, adhesividad y cohesión aumentaron por lo tanto las condiciones de uso también mejoraron y a la hora de mostrar los resultados no se completaba la gráfica de Temperatura - % Desgaste por eso se decidió aumentar el número de probetas para ser probadas a una mayor temperatura.

El procedimiento para la fabricación de las probetas fue el siguiente:

1. Se coloca el material pétreo en charolas y junto con los moldes para la fabricación de las probetas mostrados en la figura 5.3, se introducen al horno eléctrico a una temperatura de 160 °C durante 24 hrs. para que el material quede completamente seco y los moldes se encuentren calientes para que no se adhiera la mezcla asfáltica a la hora de la fabricación.

Figura 5. 3 Moldes para la fabricación de probetas



2. Se saca una muestra de asfalto, para nuestra investigación un asfalto tipo AC-20 modificada con ELVALOY®, y se coloca en el horno eléctrico junto con el material pétreo, 2 hrs. antes de que se comience a fabricar, se observa que la temperatura es mayor a la indicada en el método (esto se debe a que el asfalto modificado con polímero tiene una temperatura de reblandecimiento es mayor que la de un asfalto convencional), para que el asfalto adquiera el estado líquido y así facilitar la incorporación del asfalto con el material pétreo a la hora de realizar la mezcla asfáltica.
3. Se prepara todo el equipo que se utilizará en la fabricación:
 - a. Se hacen bases de papel del diámetro interior del molde (2 por probeta).
 - b. Se coloca la báscula electrónica y se pone en ceros.
 - c. Se prende la parrilla.
 - d. Se instala el contador en la máquina compactadora Marshall figura 5.5, se programa a 50 golpes y se enciende figura 5.4.

Figura 5. 4 Contador del compactador Marshall



Figura 5. 5 Compactador Automático Marshall



4. Después con la ayuda de una bascula electrónica, se coloca la charola con la muestra de material pétreo y se destara para agregar el material asfáltico (45g de asfalto AC-20 modificado con ELVALOY®).
5. Ya colocado el material asfáltico se procede a mezclarlo, utilizando la parrilla para conservar calientes los materiales y facilitar el mezclado de estos. No se deja de mezclar hasta que las partículas del material pétreo este cubierto totalmente por asfalto como se muestra en la figura 5.6.

Figura 5. 6 .- Mezcla homogenizada



6. Cuando se tiene completa la mezcla se procede a preparar el molde en el cual va a ser vertida la mezcla de la siguiente manera:
 - a. Se saca del horno el molde (base, molde y collarín figura 5.3).
 - b. Se arma el molde colocando la base, enseguida el molde y por ultimo el collarín.
 - c. Se le colocan los círculos de papel para que no se adhiera la mezcla asfáltica con la base del molde.
7. Teniendo el molde se vierte la mezcla asfáltica, teniendo la precaución de no verterla fuera del molde.
8. Con una varilla delgada (#2, alambón de preferencia) se acomoda la mezcla asfáltica para que la probeta no quede alta y pueda ser colocada en la máquina compactadora.

9. Con la mezcla en el molde se le coloca otro círculo de papel en la parte superior, esta para que no se adhiera la mezcla asfáltica a la base del pizón de la máquina compactadora.
10. Se traslada con cuidado el molde con la mezcla asfáltica a la máquina compactadora, y se coloca en la base de esta, teniendo la precaución de que el molde se encuentre bien centrado.
11. Se coloca el pizón de la máquina colocándole el seguro y el contrapeso en la parte superior.

Figura 5. 7 Máquina compactadora



12. Se compacta la mezcla; Se le dan 50 golpes con el pizón en la máquina, después con mucha precaución se le da la vuelta al molde con la finalidad de que no se salga la mezcla del molde.
13. Se le dan otros 50 golpes por el otro lado de la probeta para completar el ciclo de compactación.
14. Se retira de la máquina el contrapeso, seguro y el pizón, para poder quitar el molde con la probeta de la máquina compactadora.
15. Se desarma el molde, y se regresa el collarín y la base al horno.

16. Se retiran las bases de papel de la probeta mientras esta caliente por facilidad para desprenderse antes de que se adhiera totalmente a la probeta
17. Se deja enfriar el molde con la probeta por aproximadamente dos horas figura 5.8.

Figura 5. 8 Probetas listas en proceso de enfriamiento



18. Por último se desmonta la probeta del molde con la ayuda de un pizón y un collarín, colocando el collarín debajo del molde y con el pizón, se golpea ligeramente la probeta hasta que esta salga del molde ver figura 5.9.
19. Se repiten los pasos del 3 al 17 para la fabricación de cada probeta.
20. Una vez terminada la serie de probetas se enumeran según el orden de fabricación.
21. Después de la fabricación de todas las probetas se procede a limpiar el equipo utilizado con gasolina para remover el material adherido a ellos.

Figura 5. 9 Probeta lista y marcada



5.3 Procedimiento de envejecimiento de las probetas.

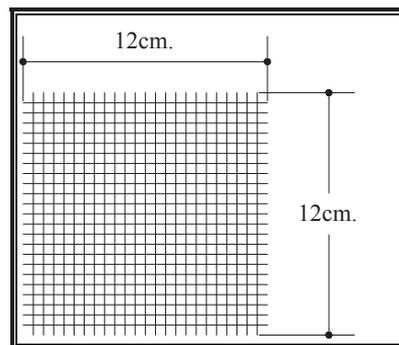
Una vez fabricadas las probetas se procede a la preparación 15 probetas para la prueba de envejecimiento (que en este caso se tendrá una duración de 32 horas) de la siguiente manera:

1. Se prepara el equipo para la realización de esta parte de la prueba:

a. Se cortan las mallas y alambres a la medida de la probeta.

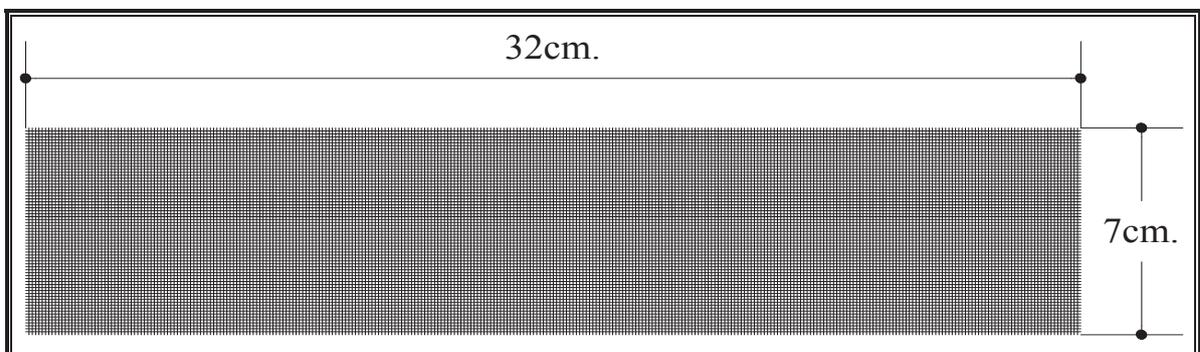
i. Dos bases de 12 x 12 cms de malla (de alambre galvanizado de $\frac{3}{8}$ x $\frac{3}{8}$ de pulgada) por cada probeta en este caso son 15 probetas por lo que se recortaron 30 bases como se muestran en la figura 5.10.

Figura 5. 10 Malla de alambre galvanizado



ii. Una sección rectangular de malla de mosquitero de 7 x 32 cms (de alambre galvanizado) por cada probeta 15 en total como se muestra en la figura 5.11.

Figura 5. 11 .-Malla de mosquitero



- iii. Quince tramos de aproximadamente 80 cm. de longitud de alambre galvanizado del #16.
 - iv. Treinta tramos de aproximadamente 35 cm. de longitud de alambre galvanizado del #16.
- b. Se traslado el horno eléctrico al edificio de posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil, para tener fácil acceso a él, ya que de visitas periódicas cada cuatro horas desde el inicio hasta el final de este procedimiento.
2. Se cubren las probetas con las mallas cortadas, como se muestran en la siguientes figuras 5.12 y 5.13.

Figura 5. 12 .-Colocación de las mallas.

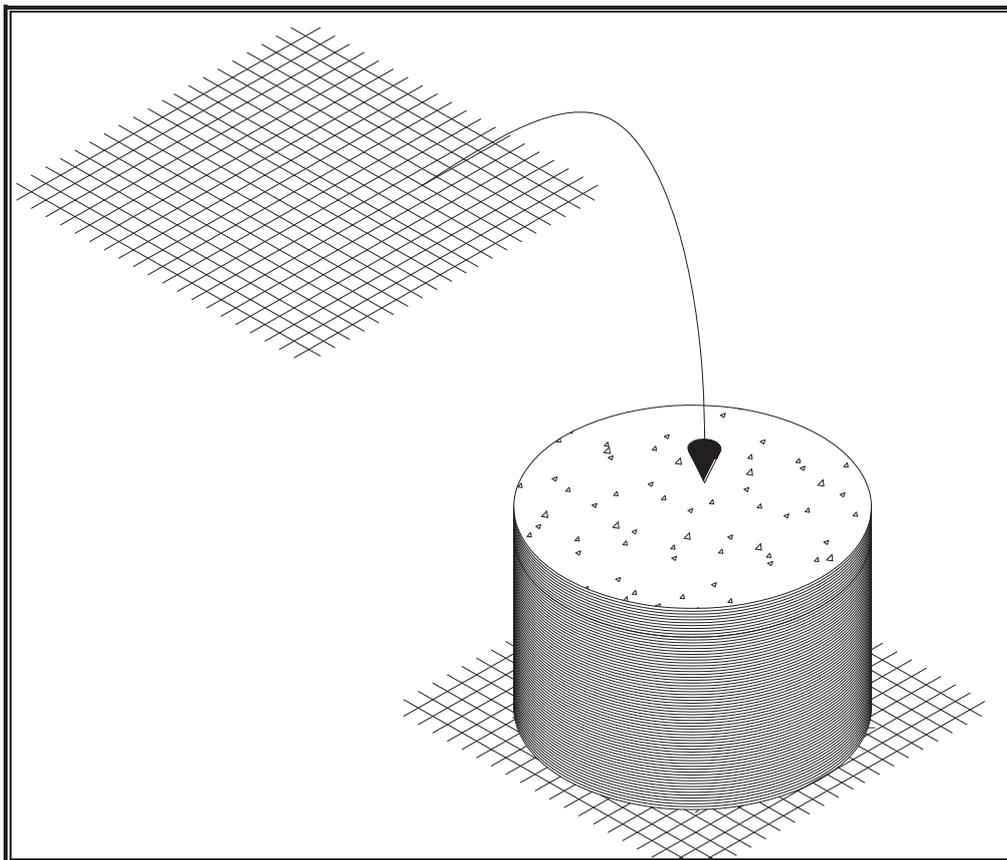
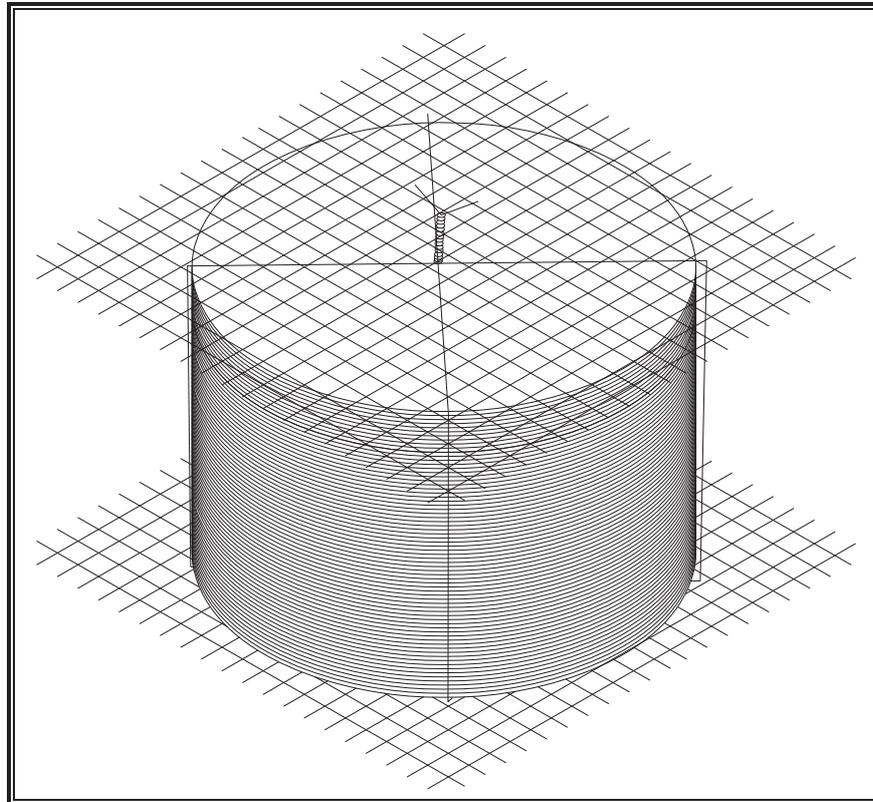


Figura 5. 13 .- Probeta preparada para la prueba de envejecimiento.



3. Se calibró el horno eléctrico a 163 ± 1 °C.
4. Se colocaron las 15 probetas ya cubiertas con las mallas a las 14:00 hrs.
5. Se sacan las primeras tres probetas a las dos horas de estar en el horno (16:00 hrs.) y se les dio vuelta a las demás.
6. Después de 4 horas desde que se inicio el envejecimiento (18:00 hrs.), se sacaron tres probetas más, de nuevo se voltearon las probetas restantes.
7. A las 8 hrs. de envejecimiento se sacaron otras tres probetas (22:00 hrs.) y se vuelve a dar vuelta a las pastillas que quedaron dentro del horno.
8. Pasadas 12 horas desde el inicio de la preparación (02:00 hrs. del día siguiente) solo se dio vuelta a las probetas.
9. Cuando se cumplieron 16 horas de envejecimiento (06:00 hrs. del día siguiente) se sacan de nuevo otras tres probetas y se les da vuelta al resto de las probetas.
10. Después solo se le dio vuelta a las probetas cada 4 horas (10:00 hrs., 14:00 hrs., 18:00 hrs., del día siguiente),

11. Hasta que las ultimas probetas cumplieron las 32 horas de envejecimiento (22:00 hrs. del día siguiente) y se retiraron del horno y se dejan enfriar.
12. Ya que se terminaron de envejecer las probetas se retiraron las mallas y se marcaron según el tiempo de envejecimiento (2, 4, 8, 16 y 32 horas).
13. Se regresó el horno eléctrico al laboratorio de materiales de la U.M.S.N.H., junto con las probetas para ser probadas.

5.4 Procedimiento de Baño Marshall.

Para la preparación de las probetas que fueron sometidas Baño Marshall en agua para conocer cual es el efecto que esta produce a los materiales se procedió de la siguiente manera:

1. Se preparó el equipo necesario para este procedimiento:
2. Se lavó la máquina para baño Marshall (ver figura 5.14) con la que dispone el Laboratorio de Materiales de la U.M.S.N.H. y se le colocó agua limpia.
3. Se calibró la máquina a $60 \pm 2^\circ\text{C}$.
4. Se introdujeron las probetas en el agua cuando esta tenía la temperatura deseada ($60 \pm 2^\circ\text{C}$).
5. Después de cumplidas 24 horas exactas se sacaron las probetas del agua.
6. Se dejaron las probetas que escurrieran para después ser probadas.

Figura 5. 14 Máquina de Baño Marshall.



5.5 Ensayo de las probetas

Ya que se tienen las probetas fabricadas y preparadas se procede a los ensayos de estas, considerando los diferentes parámetros de temperatura (-10, 5, 20, 40, 60 °C.) para las probetas preparadas para conocer el efecto del agua y las que serán probadas por efecto de la temperatura. Las probetas que se envejecieron se deben de probar a temperatura ambiente.

Los ensayos se realizaron en la máquina de los Ángeles que se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la U.M.S.N.H.

5.5.1 Descripción de la prueba de desgaste.

1. Se prepara el equipo:
 - a. Se calibra el horno a la temperatura deseada (40, 60 y 80 °C).
 - b. Debido a que en la máquina de los Ángeles el contador de revoluciones no funciona, se determina el tiempo en el que tarda en ejecutar las 300 vueltas que son las que requiere esta prueba, para este caso el tiempo fue de siete minutos y diez y siete segundos.
 - c. Se instala la báscula electrónica para conocer los pesos de las probetas.

Figura 5. 15 Registro del peso de la probeta



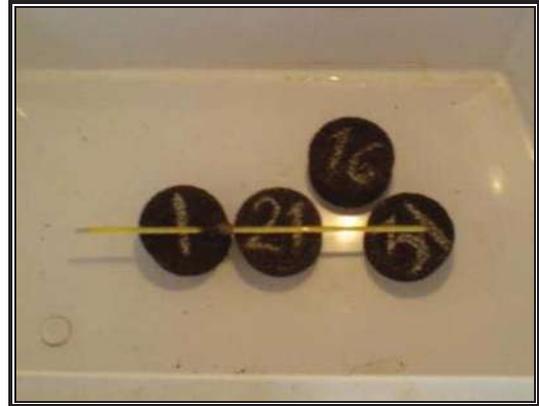
-
-
-
- d. Se calibra el congelador a la temperatura deseada (-10 y 5°C).

2. Ya calibrado el horno a los 40°C se introducen las probetas, tres probetas por cada uno de los factores de análisis, en este experimento solo se introducen tres probetas para el estudio del efecto de temperatura y tres probetas preparadas en inmersión de agua, debido a que las probetas de envejecimiento se prueban a temperatura ambiente, estas no se colocaron en el horno. Las probetas estuvieron dentro del horno por un tiempo de 2 horas para que estas adquirieran la temperatura deseada.
3. Después de las 2 horas en el horno se saca una probeta.
4. Se pesa rápidamente en la bascula electrónica, para obtener el peso inicial (P_i) que tiene la probeta.
5. Se coloca la probeta dentro de la máquina de los Ángeles, se le coloca la tapa y se inicia la prueba.
6. La prueba se terminó cuando se cumplieron las 300 revoluciones (siete minutos y dieciocho segundos).
7. Se saca la probeta de la máquina de los Ángeles y se pesa en la bascula electrónica para así obtener el peso final (P_f).
8. Se gira manualmente la máquina de los Ángeles para que salgan las partículas desprendidas durante la prueba.
9. Una vez que se terminó de probar las 6 probetas designadas para ser probadas a los 40°C, se vuelve a calibrar el horno pero ahora a los 60°C y después a 80°C.
10. Ya calibrado el horno a los 60°C se repiten los pasos del 3 al 8 hasta terminar con las 6 probetas siguientes.
11. Ya calibrado el horno a los 80°C se repiten los pasos del 3 al 8 hasta terminar con las 6 probetas siguientes.
12. Ahora se procede calibrar el congelador a los 5°C y se introducen tres probetas que serán probadas por efecto de temperatura y tres probetas de inmersión en agua.

Figura 5. 16 Congelador



Figura 5. 17 Probetas en el Congelador



13. Se dejan en el congelador durante 2 horas para que las probetas adquieran la temperatura deseada.
14. Después de pasadas las 2 horas en el congelador se saca una probeta y se pesa en la báscula electrónica para obtener su peso inicial (P_i).
15. Se repite el procedimiento de los pasos 3 al 8, esto hasta culminar con las 6 probetas.
16. Nuevamente se calibra el congelador, pero ahora a los -10°C y se introducen las 6 probetas más (tres probetas por efecto de temperatura y tres probetas de inmersión en agua).
17. Se pesan y se prueban una a una con el mismo procedimiento (pasos del 4 al 8).

Debido a que el horno eléctrico no puede ser calibrado a 20°C , ya que el termostato no es eficiente para una temperatura tan baja; y el congelador tampoco pudo ser calibrado a esta temperatura se procedió a buscar una zona en el laboratorio de materiales en donde se encontrara una temperatura de 20°C y que esta se mantuviera constante, por lo cual las probetas fueron colocadas sobre la mesa de trabajo, ya que estaban en la mesa se dejaron ahí durante 2 horas para que adquirieran la temperatura deseada.

Después de que las probetas alcanzaron la temperatura se procedió a realizar la prueba con el mismo procedimiento ya descrito con anterioridad (pasos del 4 al 8). Así mismo, para las probetas que fueron preparadas para analizar el efecto del envejecimiento, se realizó el mismo procedimiento de los pasos 4 al 8 del procedimiento ya descrito.

5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.6.1 PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO

En la siguiente tabla (Tabla 5.1) se muestran los resultados obtenidos en la prueba aplicada en las 15 probetas sometidas al envejecimiento:

Tabla 5. 1 Resultados de la prueba de envejecimiento

HORAS	No.	Pi	Pf	Pi-Pf	Pd	Pd prom
2	1	1.011	0.804	0.207	20.475	20.928
	2	1.022	0.801	0.221	21.624	
	3	1.020	0.809	0.211	20.686	
4	1	1.001	0.669	0.332	33.147	30.806
	2	0.976	0.686	0.290	29.713	
	3	1.019	0.718	0.301	29.539	
8	1	0.987	0.542	0.445	45.086	46.028
	2	0.984	0.515	0.469	47.663	
	3	0.997	0.545	0.452	45.336	
16	1	0.999	0.337	0.662	66.266	64.140
	2	0.994	0.367	0.627	63.078	
	3	1.002	0.370	0.632	63.074	
32	1	0.993	0.342	0.651	65.559	68.345
	2	1.017	0.360	0.657	64.602	
	3	1.003	0.252	0.751	74.875	

$$P_d = \left[\left(P_i - P_f \right) / P_i \right] * 100$$

Dónde: P_d = Pérdidas por Desgaste (%)

P_i = Peso inicial (gr.)

P_f = Peso final (gr.).

En esta gráfica se muestra de una forma más sencilla el análisis de resultados y se observa claramente el comportamiento del asfalto sometido al efecto de envejecimiento.

Figura 5. 18 Gráfica de resultados de las probetas sometidas a la prueba de envejecimiento

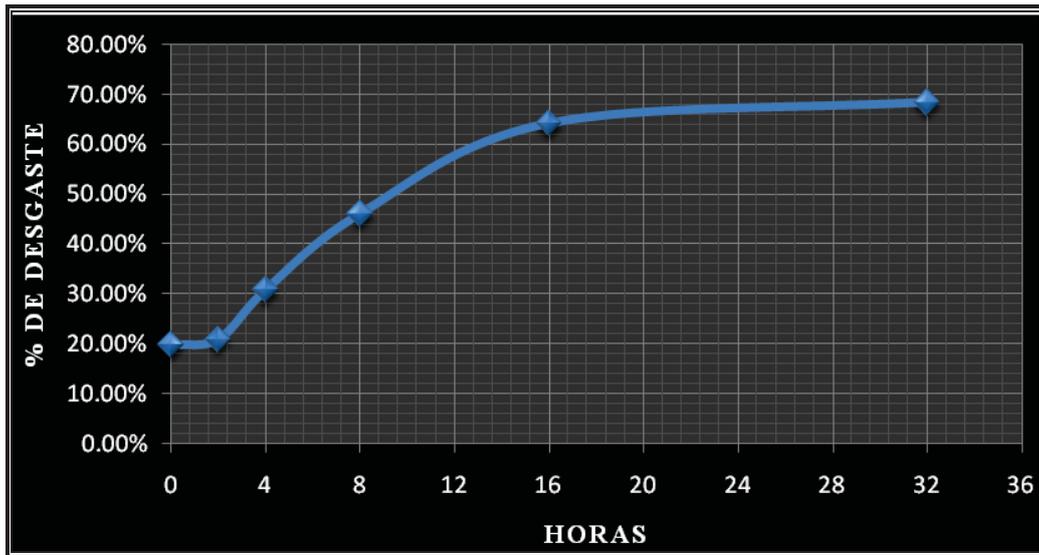
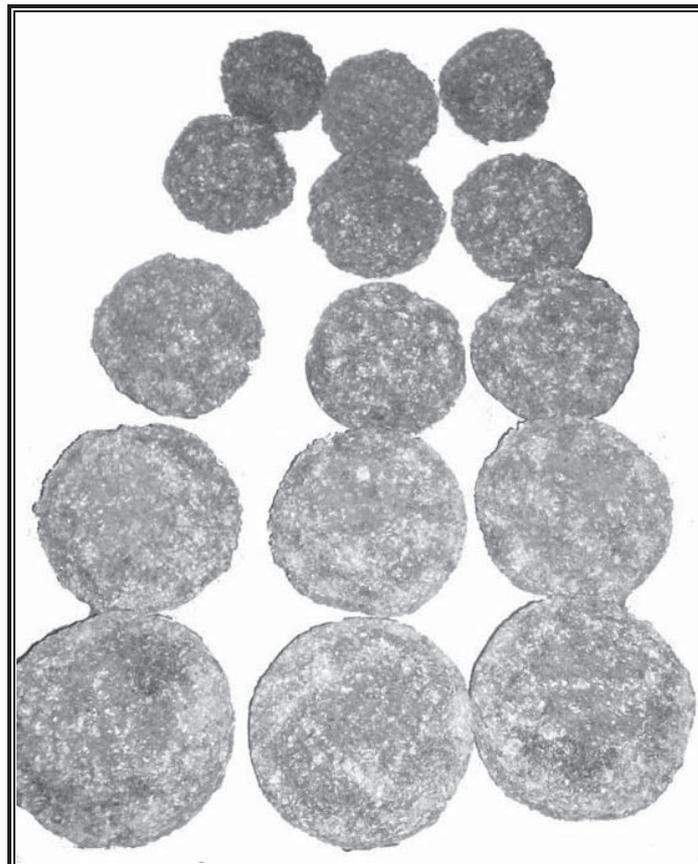


Tabla 5. 2 Resultados expresados en porcentaje de perdidas (promedios).

RESULTADOS	
0	19.84%
2	20.93%
4	30.81%
8	46.03%
16	64.14%
32	68.35%

A continuación se muestra una figura en la cual se aprecian las probetas desgastadas según la temperatura a la que fueron probadas 2, 4, 8, 16 y 32 hrs. de abajo hacia arriba, se observa claramente el efecto que tiene el envejecimiento sobre el asfalto

Figura 5. 19 Desgaste de las probetas según su envejecimiento.



5.6.2 PRUEBA DE INMERSIÓN EN AGUA

En la siguiente tabla (Tabla 5.3) se muestran los resultados obtenidos en la prueba aplicada en las 18 probetas sometidas a la prueba de inmersión en agua:

Tabla 5. 3 Resultados de la prueba de inmersión en agua.

TEMP. (°C)	No.	Pi	Pf	Pi-Pf	Pd	Pd prom
-10	1	1.048	0.402	0.646	61.641	64.250
	2	1.014	0.312	0.702	69.231	
	3	1.023	0.390	0.633	61.877	
5	1	1.020	0.511	0.509	49.902	48.115
	2	1.023	0.495	0.528	51.613	
	3	1.025	0.586	0.439	42.829	
20	1	1.063	0.839	0.224	21.072	28.122
	2	1.031	0.608	0.423	41.028	
	3	0.997	0.775	0.222	22.267	
40	1	1.023	0.906	0.117	11.437	11.432
	2	1.028	0.908	0.120	11.673	
	3	1.037	0.921	0.116	11.186	
60	1	1.021	0.942	0.079	7.738	9.806
	2	1.013	0.920	0.093	9.181	
	3	1.008	0.882	0.126	12.500	
80	1	1.015	0.606	0.409	40.296	46.694
	2	1.008	0.483	0.525	52.083	
	3	1.023	0.535	0.488	47.703	

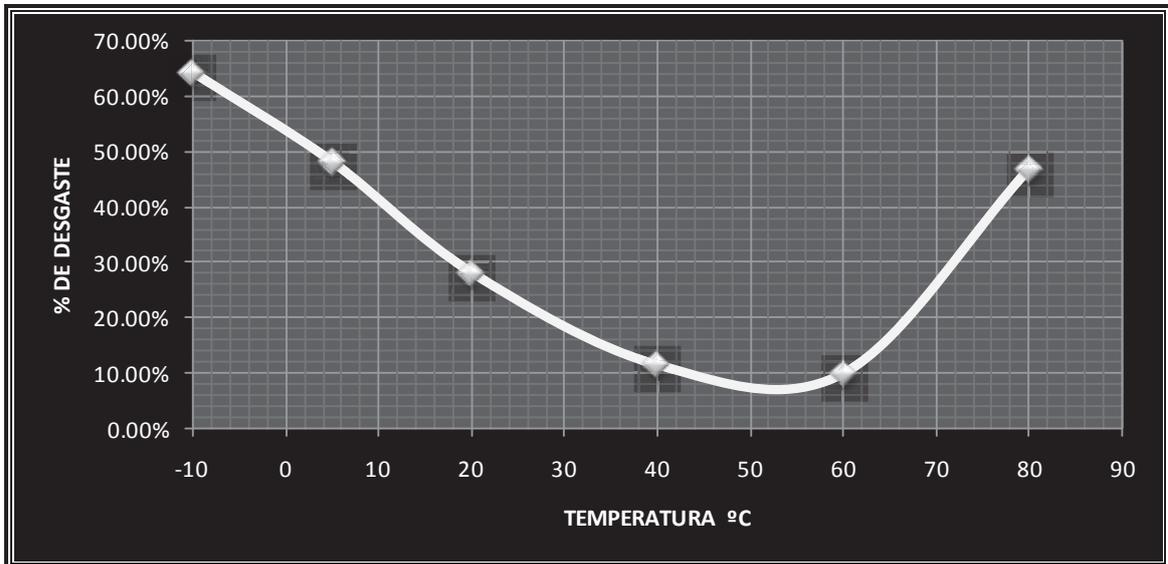
$$P_d = \left[\frac{(P_i - P_f)}{P_i} \right] * 100$$

Dónde: P_d= Pérdidas por Desgaste (%)

P_i= Peso inicial (gr.)

P_f= Peso final (gr.).

Figura 5. 20 Gráfica de resultados de las probetas sometidas a la prueba de Inmersión



5.6.3 PRUEBA DE LAS PROBETAS VÍRGENES.

En la siguiente tabla (Tabla 5.4) se muestran los resultados obtenidos en la prueba aplicada en las 18 probetas sometidas a la prueba de inmersión en agua:

TEMP. (°C)	No.	Pi	Pf	Pi-Pf	Pd	Pd prom
-10	1	1.015	0.386	0.629	61.970	61.047
	2	1.031	0.370	0.661	64.113	
	3	0.999	0.429	0.570	57.057	
5	1	1.015	0.614	0.401	39.507	39.220
	2	1.016	0.623	0.393	38.681	
	3	1.021	0.618	0.403	39.471	
20	1	0.991	0.794	0.197	19.879	19.850
	2	0.970	0.754	0.216	22.268	
	3	1.017	0.840	0.177	17.404	
40	1	1.028	0.985	0.043	4.183	4.331
	2	0.981	0.942	0.039	3.976	
	3	0.972	0.925	0.047	4.835	
60	1	0.980	0.920	0.060	6.122	6.265
	2	1.030	0.968	0.062	6.019	
	3	1.007	0.940	0.067	6.653	
80	1	0.997	0.530	0.467	46.841	43.216
	2	1.004	0.594	0.410	40.837	
	3	1.015	0.589	0.426	41.970	

Tabla 5. 4 Resultados de la prueba de inmersión en agua.

$$P_d = \left[\left(P_i - P_f \right) / P_i \right] * 100$$

Dónde: P_d = Pérdidas por Desgaste (%)

P_i = Peso inicial (gr.)

P_f = Peso final (gr.)

Figura 5. 21 Gráfica de resultados de las probetas en estado virgen.

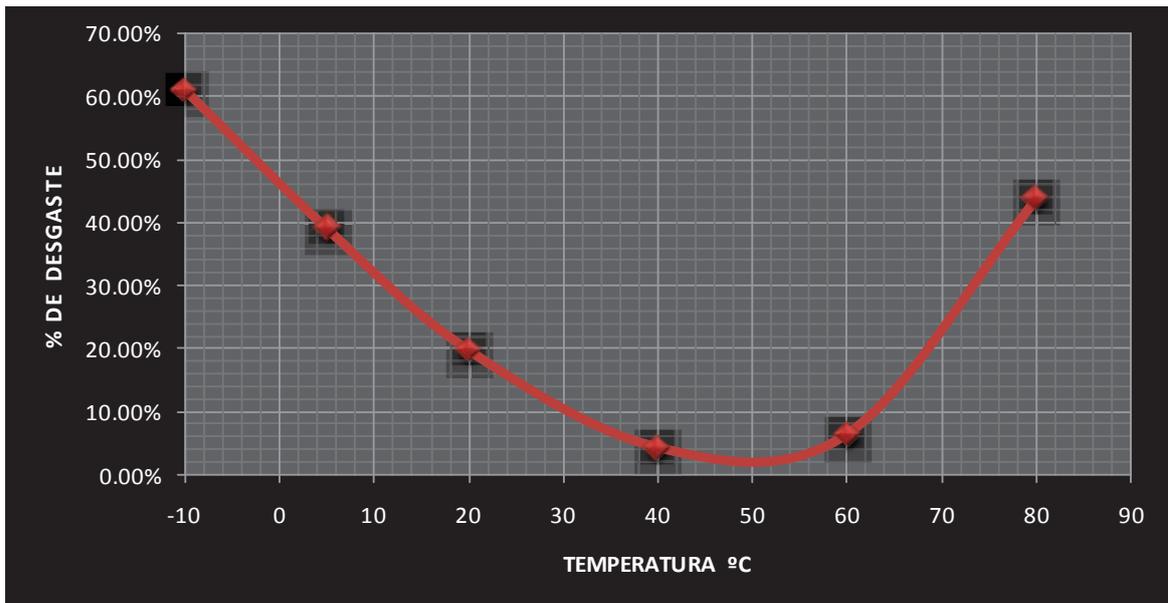
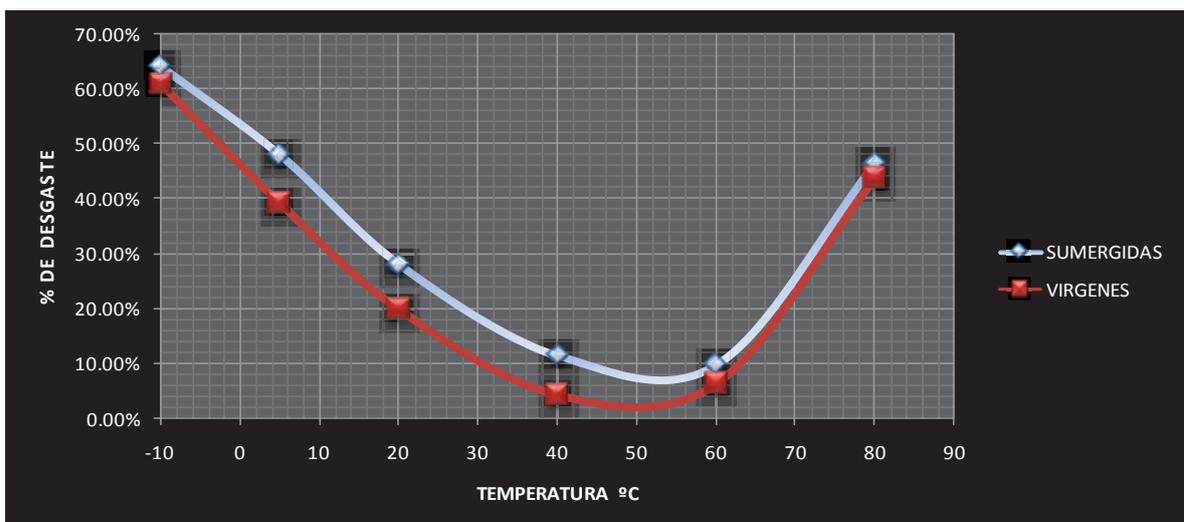


Figura 5. 22 Gráfica comparativa de resultados



CONCLUSIONES:

Con los resultados de las tablas anteriores concluimos los ensayos de cada una de las mezclas, presentando los porcentajes de desgaste y graficándolos para tener una visión mas clara del comportamiento del agregado pétreo en combinación con el asfalto modificado con ELVALOY®.

Hacer el análisis de las características de la mezcla asfáltica mediante ensayos tradicionales es difícil y no podemos garantizar que nuestros resultados nos muestren verdaderamente como es el comportamiento entre el agregado pétreo y el asfalto modificado. Es por eso que debemos destacar la gran importancia de estudiar el comportamiento entre éstos elementos mediante el método UCL®, ya que nos muestra de forma clara y sencilla, la variación de la cohesión de las mezclas al utilizar un asfalto modificado con ELVALOY®, así como su vulnerabilidad al variar la temperatura.

En este trabajo de investigación se pudo comprobar que al aumentar la temperatura se pierde consistencia y se disminuye la cohesión entre las partículas, por otra parte, cuando se disminuye la temperatura, se fragiliza la mezcla y también se incrementan las pérdidas por desgaste.

En este trabajo se ha podido analizar con la ayuda del método UCL® □ la resistencia al desgaste de las mezclas, de esta forma se ha podido observar, entre otras cosas, que la incorporación de Polímeros al asfalto resulta con muchos beneficios para la fabricación de mezclas con los pétreos utilizados, ya que presentan una mayor resistencia al desgaste y las pérdidas son menores que en el caso del asfalto convencional sin polímero.

A manera de conclusión sobre el uso de asfaltos modificados con polímeros se pueden enumerar una serie de ventajas y desventajas de los asfaltos modificados con polímeros.

Ventajas

1. Disminuye la susceptibilidad térmica
 - Se obtienen mezclas más rígidas a altas temperaturas de servicio reduciendo el ahuellamiento.
 - Se obtienen mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio reduciendo el fisuramiento.
2. Disminuye la exudación del asfalto: por la mayor viscosidad de la mezcla, su menor tendencia a fluir y su mayor elasticidad.
3. Mayor elasticidad: debido a los polímeros de cadenas largas.
4. Mayor adherencia: debido a los polímeros de cadenas cortas.
5. Mayor cohesión: el polímero refuerza la cohesión de la mezcla.
6. Mejora la trabajabilidad y la compactación: por la acción lubricante del polímero o de los aditivos incorporados para el mezclado.
7. Mejor impermeabilización: en los sellados bituminosos, pues absorbe mejor los esfuerzos tangenciales, evitando la propagación de las fisuras.
8. Mayor resistencia al envejecimiento: mantiene las propiedades del ligante, pues los sitios más activos del asfalto son ocupados por el polímero.
9. Mayor durabilidad: los ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio, demuestran su excelente resistencia al cambio de sus propiedades características.
10. Mejora la vida útil de las mezclas: menos trabajos de conservación.
11. Fácilmente disponible en el mercado.
12. Permiten mayor espesor de la película de asfalto sobre el agregado.
13. Mayor resistencia al derrame de combustibles.
14. Reduce el costo de mantenimiento.
15. Aumenta el módulo de la mezcla.
16. Permite la reducción de hasta el 20% de los espesores por su mayor módulo.

17. Mayor resistencia a la flexión en la cara inferior de las capas de mezclas asfálticas.
18. Permite un mejor sellado de las fisuras.
19. Buenas condiciones de almacenamiento a temperaturas moderadas.
20. No requieren equipos especiales.

Desventajas

1. Alto costo del polímero.
2. Dificultades del mezclado:
 - No todos los polímeros son compatibles con el asfalto base (existen aditivos correctores).
 - Punto de reblandecimiento más alto, se tiene que aumentar la temperatura para el mezclado.
3. Los agregados no deben estar húmedos ni sucios.
4. La temperatura mínima de distribución es de 145°C por su rápido endurecimiento

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- 1)- The asphalt Institute. Manual del asfalto. Bilbao.Ediciones Urmo, 1973.
- 2)- Comisión permanente del asfalto de la Republica Argentina. Vigésimo Octava Reunión del Asfalto. Buenos Aires, Argentina, 1995.
- 3)- Revista Rutas. Madrid. Edita: Revistas de la Asociación Técnica de Carreteras, Diciembre de 1997.
- 4)- Construcciones Pan-Americana. Guía Mundial del Comprador Internacional Buyer's Guide. Mayo 2003.
- 5)- Revista Carreteras. Asociación Argentina de Carreteras. Mayo 1993.
- 6)- A.Chiman, L.Sanabria, L.Hernandez, L.Chiman. Evaluación de las Propiedades de Asfaltos Modificados con Polímeros Activados. Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector de Transporte e Industrial Corasfaltos.
- 7)- Anderson, K. (1996), "Advocates & Aggregates", TR News, Vol. 184, Transportation Research Board, National Research Council, N.W., Washington, D.C, pp. 8-13.
- 8)- Asphalt Institute (1993), "Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types", Asphalt Institute, Manual Series No. 3.
- 9)- Austroads (1997), "APRG Report No. 18, Selection and Design of Asphalt Mixes", Australian Provisional Guide, Austroads, Sydney.
- 10)- Botasso, Balige, Mikelaite, Bisio, González y Rebollo (2003), "Nueva metodología para la valoración de la adherencia árido ligante", Buenos Aires, Argentina.
- 11)- Departamento Técnico Pavimentación Asfaltos Chilenos S.A. (2001), "Experiencias y Estudios con Asfalto Multigrado", Chile, Chile

12)- Kraemer, C., Morilla, I., del Val, M.A. (1999), “Carreteras II”, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones-Colegios Escuelas, Madrid.

13)- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo de España, (MOPU) (1981), “Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3”, Dirección General de Carreteras, Madrid.

14)- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo de España, (MOPU) (1989), “Recomendaciones sobre mezclas bituminosas en caliente”, Dirección General de Carreteras, Circular No. 299/89 T.

15)- Torrejón O. Julio (2003), “Asfalto: un Material con Múltiples Aplicaciones“, Chile, Chile.

16)- Yoder, E. J. y Witzak, M. W. (1975), “Principles of pavement design”, John Wiley & Sons Inc., Second Edition, USA.

17)- MERRIT, Frederick S. Abril de 1998. *MANUAL DEL INGENIERO CIVIL*. McGraw–Hill.

INTERNET

1) www.normas.imt.mx <Normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes>.

2) www.asphaltinstitute.org

3) www.cpasfalto.org

4) www.styrelf.com.es

5) www.monografias.com

6) www.elprisma.com

7) www.dupont.com