UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

RECINTO UNIVERSITARIO PEDRO ARAÚZ PALACIOS

FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

MONOGRAFÍA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS-REOLÓGICAS DE CEMENTOS ASFÁLTICOS CONVENCIONALES Y MODIFICADOS CON POLÍMEROS, EMPLEANDO CAL HIDRATADA

BR. NADIESKA ALEXANDRA TIFFER SABALLOS

BR. FRANKLIN GERARDO MORA UMAÑA

TUTOR:

DR. CARLOS HUMBERTO FONSECA RODRÍGUEZ

ASESOR:

ING. ORLANDO LÓPEZ PEÑA

MANAGUA, 11 DE SEPTIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCION
DECANATURA

DEC-FTC-REF-No.007
Managua, enero 14 del 2014

Bachilleres
NADIESKA ALEXANDRA TIFFER SABALLOS
FRANKLIN GERARDO MORA UMAÑA
Presente

Estimados Bachilleres:

Es de mi agrado informarles que el PROTOCOLO de su Tema Monográfico titulado "EVALUACION DE PROPIEDADES MECANICAS REOLOGICAS DE CEMENTOS ASFALTICOS CONVENCIONALES Y MODIFICADOS CON POLIMEROS EMPLEANDO CAL HIDRATADA", ha sido aprobado por esta Decanatura.

Así mismo les comunico estar totalmente de acuerdo, de que el Dr. CARLOS HUMBERTO FONSECA RODRIGUEZ, sea el tutor de su trabajo final, y como Asesor al Ing. ORLANDO LOPEZ PEÑA.

La fecha límite, para que presenten concluido su documento, debidamente revisado por el tutor guía será el 31 Julio del 2014.

Esperando puntualidad en la entrega de la Tesis, me despido.

Atentamente,

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Tecnología de la Construcción
DECANO
MANAGUA, NICARAGUA

Dr. Ing. Oscar Gutiérrez Somarriba
Decano

CC: Protocolo
Tutor
Archivo*Consecutivo
DIOGS*mary

TECNOLÓGICO
DE MONTERREY

Monterrey, N.L., México, 20 de Junio de 2014

Dr. Óscar Gutiérrez Somarriba
Decano
Facultad de Tecnología de la Construcción
Universidad Nacional de Ingeniería

Estimado Dr. Gutiérrez Somarriba,

Por medio del presente por este medio tengo a bien informarle que el trabajo monográfico autorizado por esa decanatura a los Bachilleres Nadieska Alexandra Tiffer Saballos y Franklin Gerardo Mora Umaña, titulado ***"Evaluación de Propiedades Mecanicas - Reológicas de Cementos Asfalticos Convencionales y Modificados con Polimero, Empleando Cal Hidratada"***, ha concluido exitosamente.

Después de haber acompañado el desarrollo de cada uno de los aspectos de la monografía puedo asegurarle que el trabajo reúne todas las exigencias que manda nuestra alma mater como último requisito para optar al título de Ingeniero Civil.

Solicito el nombramiento del tribunal examinador y marque la fecha que estime conveniente para que los sustentantes puedan defender su monografía.

Por lo anterior, agradezco el apoyo que se le pueda dar a Nadieska Alexandra Tiffer Saballos y Franklin Gerardo Mora Umaña para concluir con los trámites necesarios y así optar a su título profesional de Ingeniero Civil.

Cordialmente,

Dr. Carlos Humberto Fonseca Rodríguez
Director del Centro de Diseño y Construcción
Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Civil
ITESM, Campus Monterrey
Monterrey, Nuevo León México
http://www.mty.itesm.mx/profesores/dia/carlos_humberto_fonseca.html
http://www.mty.itesm.mx/dia/carreras/ic/
Tel: +52 81 8350 2000 ext. 5370 y 5371

cc. Archivo.

TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®
Centro de Diseño y Construcción
Campus Monterrey

Campus Monterrey
Eugenio Garza Sada 2501
64849, Monterrey, N.L., México
Tel: 52/81 8358 2000

Agradecimientos

Son muchas las personas que generosamente nos han brindado parte de su tiempo y su experiencia para desarrollar este trabajo, sin embargo sería injusto no hacer especial mención de aquellas cuya colaboración ha sido imprescindible para la realización del mismo.

En primer lugar, agradecer a Dios quien ha guiado nuestro camino con amor, fortaleza y fe para cumplir uno de nuestros más anhelados sueños.

A nuestros padres por ser la razón de nuestra existencia, por esos ideales inculcados con amor, por ese apoyo incondicional que con su esfuerzo día a día hicieron posible que culmináramos con éxito una etapa más de nuestras vidas.

A nuestro tutor, Dr. Carlos Humberto Fonseca Rodríguez, que con mucho aprecio le agradecemos que nos haya brindado la oportunidad de desarrollar el tema, así como las ideas sugeridas, su incondicional disponibilidad en la orientación de este trabajo y por permitirnos realizar las prácticas en el Laboratorio de Materiales Asfálticos del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, (ITESM), Campus Monterrey.

Agradecemos también la ayuda de nuestro asesor el Ing. Orlando López Peña por su colaboración. Así mismo al personal del laboratorio de asfaltos de la escuela antes mencionada, que sin ellos no hubiese sido posible el proceso experimental.

A la Lic. Isabel Sevilla Luco y a todas aquellas otras personas que de una u otra forma nos animaron a la realización de este trabajo, nuestros más sinceros agradecimientos.

Resumen General

El presente trabajo monográfico consistió en el estudio de las propiedades mecánicas-reológicas de cementos asfálticos y la influencia que en ellos tiene la adición de un llenante mineral (cal hidratada).

Primeramente se realizaron ensayos para caracterizar las propiedades de los cementos asfálticos y después mediante la metodología experimental conocida como Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL), se evaluó el comportamiento de la mezcla asfáltica compuesta por distintos cementos asfálticos.

Cabe mencionar que las prácticas se elaboraron en el Laboratorio de Materiales Asfálticos del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, (ITESM), Campus Monterrey.

Índice General

Índice de Tablas v
Índice de Figuras y Fotos vi
Glosario viii
Capítulo 1. Introducción 2
1.1 Antecedentes 3
1.2 Justificación 5
1.3 Objetivos 6
1.3.1 Objetivo General: 6
1.3.2 Objetivos Específicos: 6
1.4 Metodología de la Investigación 7
Capítulo 2. Materiales para Mezclas Asfálticas en Caliente 9
2.1 Agregado Pétreo 9
2.1.1 Basalto 9
2.1.1.1 Origen 9
2.1.1.2 Historia 10
2.1.1.3 Propiedades y uso del basalto 10
2.2 Filler 11
2.2.1 Cal hidratada 12
2.2.1.1 Historia 12
2.2.1.2 Cal hidratada un componente para la mezcla asfáltica 13
2.3 Asfalto 14
2.3.1 Reseña histórica 14
2.3.2 Definición 15
2.3.3 Composición 15
2.3.4 Clasificación 15
2.3.4.1 Cementos asfálticos 16
2.3.4.1.1 Requisitos de calidad de los cementos asfálticos 17
2.3.4.1.2 Tipos de cementos asfálticos 18
Capítulo 3. Métodos Convencionales de Caracterización de Asfaltos 23
3.1 Densidad 23
3.1.1 Contenido 23
3.1.2 Objetivo 23

3.1.3 Equipo 23
3.1.4 Procedimiento 25
3.1.5 Cálculos 26
3.1.6 Precauciones para evitar errores 26
3.2 Penetración 27
3.2.1 Contenido 27
3.2.2 Objetivo 27
3.2.3 Equipo 27
3.2.4 Preparación de la muestra 29
3.2.5 Procedimiento 30
3.2.6 Cálculos y resultados 31
3.2.7 Precauciones para evitar errores 32
3.3 Punto de Reblandecimiento Anillo y Bola 33
3.3.1 Contenido 33
3.3.2 Objetivo 33
3.3.3 Equipo y materiales 33
3.3.4 Preparación de la muestra 37
3.3.5 Ejecución del ensayo 38
3.3.6 Resultados 39
3.3.7 Recomendaciones para evitar errores 39
3.4 Índice de Penetración del Asfalto 40
3.4.1 Contenido 40
3.4.2 Objetivo 40
3.4.3 Fundamento y cálculo 40
3.5 Ductilidad 43
3.5.1 Contenido 43
3.5.2 Objetivo 43
3.5.3 Equipo y materiales 43
3.5.4 Preparación de la muestra 46
3.5.5 Procedimiento 47
3.5.6 Resultados 48
3.5.7 Precauciones para evitar errores 48
3.6 Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos 49
3.6.1 Contenido 49

3.6.2 Objetivo 49
3.6.3 Equipo 49
3.6.4 Preparación del equipo 50
3.6.5 Preparación de la muestra 50
3.6.6 Procedimiento 51
3.6.7 Cálculos y resultados 52
3.6.8 Precauciones para evitar errores 52
3.7 Recuperación Elástica por Torsión 53
3.7.1 Contenido 53
3.7.2 Objetivo 53
3.7.3 Equipo y materiales 53
3.7.4 Procedimiento 54
3.7.5 Cálculos y resultados 55
3.8 Recuperación Elástica por Ductilómetro 58
3.8.1 Contenido 58
3.8.2 Objetivo 58
3.8.3 Equipo 58
3.8.4 Procedimiento 60
3.8.5 Cálculos y resultados 61
Capítulo 4. Método Universal de Caracterización de Ligantes® 64
4.1 Origen 64
4.2 Características 64
4.3 Aplicación 69
4.3.1 Breve descripción del proyecto de investigación 69
4.3.1.1 Cementos asfálticos evaluados 69
4.3.1.2 Evaluación de la cohesión 70
Capítulo 5. Ensayos 75
5.1 Materiales 75
5.1.1 Áridos 75
5.1.2 Cal hidratada 75
5.1.3 Cementos asfálticos 75
5.2 Diseño Experimental 76
5.2.1 Equipos de laboratorio 76
5.2.2 Separación de partículas de los áridos 77

5.2.3 Peso de los áridos 78
5.2.4 Secado de los áridos 78
5.2.5 Calentamiento del C.A 78
5.2.6 Confección de probetas 79
5.2.6.1 Probetas de AC-20 79
5.2.6.1.1 Ejemplo de diseño de una probeta de AC-20 83
5.2.6.2 Probetas de AC-20 Mod-SBS 85
5.2.6.3 Probetas de AC-20 adicionándole cal hidratada 86
5.2.6.4 Probetas de AC-30 87
5.2.7 Ensayo de probetas (Determinación de pérdidas al Cántabro) 89
5.2.7.1 Susceptibilidad térmica 89
5.2.7.2 Adhesividad árido-ligante ante la acción del agua 94
5.2.7.3 Proceso de envejecimiento 95
5.3 Análisis de Resultados 97
5.3.1 Resultados de susceptibilidad térmica 97
5.3.1.1 Curvas de Estado (Porcentaje de pérdidas al cántabro-temperatura) 97
5.3.2 Resultados de envejecimiento 102
5.3.2.1 Curva de Estado (Porcentaje de pérdidas al cántabro-tiempo) 102
5.3.3 Resultados de adhesividad 103
5.4 Ensayos Adicionales 105
5.5 Encuesta Realizada a Empresas del País 105
Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones 108
6.1 Conclusiones 108
6.2 Recomendaciones 110
Bibliografía 111
Anexos 1
Anexo A. Valores de la caracterización convencional del ejemplo expuesto acerca de la aplicación del Método UCL. 2
Anexo B. Caracterización convencional de los cementos asfálticos evaluados en este estudio. 4
Anexo C. Curvas de estado del cemento asfáltico AC-30 (Lata 1 y Lata) y el promedio. 8
Anexo D. Informe de resultados de los cementos asfálticos evaluados, utilizando el Método UCL. 12

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los materiales asfálticos…… 16

Tabla 2. Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60 °C……. 17

Tabla 3. Requisitos de calidad de los cementos asfálticos……. 18

Tabla 4. Diferencias permisibles entre los valores de penetración considerados para el cálculo de resultados……..... 33

Tabla 5. Tamices estándares ASTM……..... 77

Tabla 6. Registro de datos de las probetas de AC-20……..... 85

Tabla 7. Registro de datos de las probetas de AC-20 Mod-SBS……... 86

Tabla 8. Registro de datos de las probetas de AC-20 adicionándole 0.5% de cal……..... 87

Tabla 9. Registro de datos de las probetas de AC-30, Lata 1……... 88

Tabla 10. Resultados del Método UCL con AC-20. Distintas temperaturas……... 93

Tabla 11. Resultados del Método UCL con AC-20. Condición húmeda 95

Tabla 12. Resultados del Método UCL con AC-20. Periodos de envejecimiento…… 96

Tabla 13. Cemento asfáltico convencional AC-20 con 2%, 5% y 5.5% de cal hidratada en la mezcla……... 105

Tabla 14. Encuesta realizada a empresas……... 106

Índice de Figuras y Fotos

Figura 1. Picnómetros…… 24
Figura 2. Penetrómetro para la prueba de penetración…….... 28
Figura 3. Aguja para la prueba de penetración……. 28
Figura 4. Anillo para la prueba de punto de reblandecimiento……... 34
Figura 5. Portanillos para la prueba de punto de reblandecimiento…….. 35
Figura 6. Montaje del sistema de soporte…….. 36
Figura 7. Guía para centrar la esfera…….. 36
Figura 8. Nomograma para el cálculo del índice de penetración……... 42
Figura 9. Ductilómetro…… 44
Figura 10. Molde para elaborar la briqueta…….. 45
Figura 11. Viscosímetro digital Brookfield…… 50
Figura 12. Cilindro, semicorona graduada y recipiente para la muestra…. 56
Figura 13. Esquema del depósito para el ensayo de recuperación elástica……. 57
Figura 14. Molde para la prueba de recuperación elástica del espécimen. 62
Figura 15. Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes bituminosos (Curva de estado)……..... 66
Figura 16. Evaluación de la adhesividad árido-ligante. Pérdidas al Cántabro en seco y tras inmersión……. 67
Figura 17. Curva de envejecimiento…….. 68
Figura 18. Curva de estado de los C.A ensayados……. 70
Figura 19. Adhesividad de los C.A ensayados…… 72
Figura 20. Curva de envejecimiento de los C.A ensayados…….. 73
Figura 21. Moldes de compactación Marshall…… 81
Figura 22. Compactador Marshall…….. 82
Figura 23. Alturas en las probetas……. 83
Figura 24. Máquina de Desgaste de los Ángeles…… 89
Figura 25. Susceptibilidad térmica de los cementos asfálticos evaluados. 98
Figura 26. Comparación entre los C.A convencionales y el modificado con polímero...…… 99
Figura 27. AC-20 más 3 distintas proporciones de cal hidratada……. 100
Figura 28. Comparación entre AC-20 y este mismo AC-20 pero adicionándole 3 distintas proporciones de cal…….. 101
Figura 29. Comparación entre AC-20 Mod-SBS y AC-20 más 3 distintas proporciones de cal……... 102
Figura 30. Curvas de envejecimiento de los cementos asfálticos evaluados…… 103
Figura 31. Pérdidas al cántabro en húmedo y en seco……. 104

Foto 1. Agitador de tamices…….. 77
Foto 2. Cribado del material pétreo…….. 78
Foto 3. Lata de cemento asfáltico colocado en el horno…….. 79
Foto 4. Depositando los áridos en el sartén……... 80
Foto 5. Mezclando los áridos con el betún…… 80
Foto 6. Verificando con el termómetro que la mezcla tenga la temperatura requerida (150 ºC)…….. 81
Foto 7. Extractor de probetas…… 82
Foto 8. Momento en que se extrae una probeta…… 82
Foto 9. Serie de 27 probetas……. 88
Foto 10. Probetas colocadas en congeladores…… 91
Foto 11. Probetas colocadas en una incubadora……. 91
Foto 12. Probetas colocadas en un horno…… 92
Foto 13. Ejemplo del peso de una probeta ANTES (izquierda) y DESPUÉS (derecha) de ser ensayada en la máquina de los Ángeles……..... 92
Foto 14. Probetas dentro de una tina de curado…….. 94
Foto 15. Momento en que se sacan las probetas de la tina de curado… 94
Foto 16. Simulación de los efectos de envejecimiento……... 96

Glosario

Asfalto: Es un material viscoso, pegajoso y de color negro. Su consistencia es variable y está constituido mayoritariamente por una mezcla de hidrocarburos pesados. Se encuentra en yacimientos naturales o se obtiene por refinación del petróleo. Es usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras o autopistas.

Asfaltenos: La fracción de hidrocarburo de alto peso molecular en el asfalto, que es precipitada por medio de un solvente parafinico de nafta, usando una proporción especifica de solvente-asfalto.

Adhesividad: Es la propiedad de un ligante y un agregado de adherirse uno a otro, sin peligro de perder esta propiedad en presencia de humedad.

Alongada: Largo, prolongado.

Alambique: Aparato para destilar alcohol.

Albedo: Es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.

Analcima: Pertenece a la clase silicatos, subclase tectosilicatos y es un mineral típico de las rocas volcánicas, donde aparece recubriendo, con grandes y llamativos cristales las paredes de las cavidades que se forman en este tipo de rocas.

Betún: Es la mezcla de hidrocarburos naturales o de petróleo, sólidos, viscosos o líquidos, conteniendo una pequeña proporción de productos volátiles. Tiene propiedades aglomerantes y es completamente soluble en el sulfuro de carbono. Se caracteriza por tener muy buena penetración, elasticidad y flexibilidad.

Bituminoso: Que contiene betún o tiene semejanza con él.

Biselada: Corte dado de modo oblicuo en el borde o en la extremidad de objetos limitados por dos caras paralelas.

Bulbo: Recipiente en forma de ampolla, como en un termómetro

Briqueta: Es un anglicismo con el cual se denomina al espécimen formado empleando un molde de acuerdo a la prueba que se vaya a realizar.

Cal hidratada: La cal hidratada es hidróxido de calcio. El óxido de calcio (cal viva) debe recibir una cantidad estrictamente necesaria de agua, obteniéndose un hidróxido como polvo seco, que se muele finamente.

Caolín: Arcilla blanca muy pura que se emplea en la fabricación de la porcelana y del papel.

Cemento asfáltico: Es un material que se obtiene de la destilación del petróleo, durante la cual se eliminan sus solventes volátiles y parte de sus aceites. 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.

Cohesión: Es el poder aglomerante que el ligante proporciona a la mezcla asfáltica.

Consistencia: Describe el grado de fluidez o plasticidad de un cemento asfáltico a determinada temperatura. La consistencia del cemento asfáltico varía con la temperatura, por lo tanto es necesario usar una temperatura patrón cuando se está comparando la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro. La temperatura patrón es 60 °C.

Densidad: El grado de solidez que puede alcanzarse en una mezcla dada y que solo está limitado por la eliminación total de los vacíos que se encuentran entre las partículas de la masa.

Destilación: Operación mediante la cual se separan los componentes de una mezcla de varios líquidos, debido a sus distintas presiones de vapor.

Dextrina: Sustancia gomosa soluble en agua que se obtiene del almidón.

Ductilidad: Es la capacidad que poseen los materiales de deformarse por alargamiento sin que su masa se disgregue.

Durabilidad: Es la propiedad de una mezcla asfáltica de pavimentación que describe su habilidad para resistir desintegración por efectos ambientales o de tráfico. Los efectos ambientales incluyen cambios en las características del asfalto, tales como oxidación y volatilización. Al igual que cambios en el pavimento y en el agregado debido a la acción del agua, incluyendo congelamiento y deshielo.

Emulsión: Líquido de aspecto lechoso que tiene en suspensión partículas de sustancias insolubles.

Esmerilado: Pulido.

Enrase: Alisar o allanar una superficie.

Fillers: Son sustancias finamente divididas las cuales son insolubles en asfalto pero que pueden ser dispersadas en él, como un medio de modificar sus propiedades mecánicas y consistencia. Ejemplo de fillers son: cal, cemento, polvo de tiza, cenizas de combustible pulverizada, talco, sílice, etc.

Glicerina: Alcohol incoloro de tres átomos de carbono, viscoso y dulce, que se encuentra en todos los cuerpos grasos como base de su composición.

Maltenos: Son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición.

Mástico: Masa asfáltica formada por el filler y el asfalto. Este compuesto tiene importancia fundamental en la impermeabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica. El mástico proporciona rigidez a la mezcla permitiendo que las partículas del agregado permanezcan unidas.

Matraz: Vasija esférica de cuello estrecho que se emplea mucho en los laboratorios.

Mezcla asfáltica: Es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas que se utiliza para construir firmes. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y eventualmente el rendimiento de la misma como mezcla terminada para un determinado uso.

Mordazas: Aparato formado por dos piezas entre las que se coloca un objeto para su sujeción.

Materiales bituminosos: Son sustancias de color negro, sólidas o viscosas, dúctiles, que se ablandan por el calor y comprenden aquellos cuyo origen son los crudos petrolíferos como también los obtenidos por la destilación destructiva de sustancias de origen carbonoso.

Material pétreo: Es el material inerte que se extrae de bancos naturales.

Lastra: Piedra lisa y redondeada.

Penetración: Es la consistencia de un material bituminoso expresada como la distancia, en décimas de milímetro (0.1 mm), que una aguja patrón penetra verticalmente en una muestra de material, bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura. Esto mide si el producto es líquido, semisólido o sólido.

Penetrómetro: Instrumento para medir el grado de dureza y consistencia de algo.

Picnómetro: Frasco de laboratorio, con un cierre sellado de vidrio que dispone de un tapón provisto de un finísimo capilar.

Polímero: Sustancia química constituida por moléculas o grupos de moléculas (monómeros) que se repiten y están unidos entre sí formando cadenas.

Punto de reblandecimiento: Es una medida de la susceptibilidad térmica. El punto de reblandecimiento aumenta cuando aumenta la densidad y la penetración disminuye. Un ensayo para su medida es el de Anillo y Bola (A y B) que consiste en aumentar la temperatura, midiendo cuando la bola llega al fondo del recipiente arrastrando el producto bituminoso.

Poise: Es una unidad de centímetro-grado-segundo de viscosidad absoluta, correspondiente a la viscosidad de un fluido en donde un esfuerzo de una dina por centímetro cuadrado es requerido para mantener una diferencia de velocidad de un centímetro por segundo entre dos planos paralelos del fluido, orientados en la dirección del flujo y separados por una distancia de centímetro.

Refractario: Que resiste el fuego o el calor sin cambiar de estado ni descomponerse.

Reología: Se dedica al estudio de la deformación y flujo de la materia o más precisamente de los fluidos. La palabra reología proviene del griego ρειν la cual significa fluir.

Susceptibilidad térmica: Es la aptitud que presenta un producto para variar su viscosidad en función de la temperatura. Los menos susceptibles son los oxidados, después los de penetración y los que más susceptibles son los alquitranes.

Tamiz: Aparato, en un laboratorio, usado para separar tamaños de material. Y donde las aberturas son cuadradas.

Tricloroetileno: Solvente.

Tixotropía: Es la propiedad de algunos fluidos no newtonianos y pseudoplásticos que muestran un cambio de su viscosidad en el tiempo.

Viscosidad: Es un método usado para medir la consistencia del asfalto.

Oxidación: Envejecimiento del cemento asfáltico.

Abreviaturas y Símbolos

ASTM: American Section of the International Association for Testing Materials

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation

SCT: Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México

NLT: Normas de Ensayo del Centro de Estudios de Carreteras de España

Método UCL: Método Universal de Caracterización de Ligantes

C.A: Cemento asfáltico

IP: Índice de penetración

SBS: Estireno-Butadieno-Estireno

AC-20: Cemento asfáltico convencional AC-20

AC-20 Mod-SBS: AC-20 modificado con polímero SBS al 2.5%

AC-30: Cemento asfáltico convencional AC-30

No: Número

cm: Centímetros

mm: Milímetro

min: Minuto

g: Gramo

mg: Miligramo

cp: Centipoise

°C: Grados Celsius, Centígrados

® Derechos reservados por patente

Capítulo 1

Introducción

Capítulo 1. Introducción

Para la elaboración de un tramo de carretera debemos conocer las características de la zona donde se construirá y así saber el tipo de material a emplear, según normas y especificaciones de las cuales depende la construcción de una buena capa de pavimento. En nuestro país la mayoría de las carreteras están compuestas por pavimentos flexibles, lo que convierte al asfalto en un elemento muy importante.

Hoy en día el esfuerzo de construir mejores carreteras y de mayor vida útil, ha llevado a querer interpretar a la mezcla asfáltica de mejor manera según su comportamiento en campo, es decir tratar de caracterizar sus materiales para obtener mayor resistencia, durabilidad y estabilidad en los mismos y también mejorando la gama de nuevos cementos asfálticos, ya que no basta con tener asfaltos convencionales, sino que se modificarán estos cuando se solicite mayor calidad y sobre todo un mejor comportamiento a los cambios climáticos.

Para estudiar el comportamiento que estos tendrán en el firme es que se utiliza el Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL), ya que este permite la evaluación de distintos cementos asfálticos ya sean convencionales o modificados con polímeros u otros componentes (cal hidratada), que persiguen un objetivo específico con el fin de que el comportamiento de la mezcla asfáltica sea el indicado para soportar las diferentes condiciones a la que se expone.

En el caso de la cal hidratada ha ofrecido buenos resultados en su incorporación a la mezcla asfáltica, ayudando a la adherencia entre el betún y los agregados, provocando vacíos en la mezcla suficientemente bajos, además contribuye a disminuir el daño que la humedad produce y sobre todo nos permite construir pavimentos económicos, resistentes y principalmente de una vida útil determinada.

1.1 Antecedentes

A nivel internacional se han realizado investigaciones sobre nuevos métodos para la caracterización de los distintos cementos y mezclas asfálticas que permitan estudiar el comportamiento de los materiales que van a ser puesto en servicio. En el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña los Dres. Félix Pérez Jiménez y Rodrigo Miró Recasens desarrollaron un procedimiento experimental para la caracterización de betunes, basado en el estudio de la cohesión que proporciona el ligante a la mezcla, el cual se conoce como Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL®).

Esta nueva metodología por ser directa y a la vez sencilla es utilizada en muchos países como EE.UU., Europa y México.

México es el primer país de América Latina donde se aplica este método, impulsado por el Dr. Carlos Fonseca Rodríguez, profesor titular del departamento de ingeniería civil del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITEMS, Campus Monterrey).

Esta escuela en colaboración con otras organizaciones lleva a cabo estudios relacionados con distintas alternativas para mejorar el comportamiento de la mezcla asfáltica y el uso de asfaltos modificados para prolongar la vida útil de los pavimentos flexibles.

En este estudio se empleó el Método UCL usando cemento asfáltico, basalto y cal hidratada, el cual es un procedimiento que no se utiliza en Nicaragua, es una opción presentarlo y dar a conocer su fácil uso y las ventajas que ofrece.

El uso de la cal hidratada en pavimentos flexibles se ha venido implementando en diferentes países y se ha demostrado por más de 50 años que ayuda a mitigar el daño que la humedad produce al pavimento asfáltico.

En los EE.UU. el uso de la cal hidratada en los asfaltos se ha venido utilizando hace muchos años con el fin de obtener un mejor comportamiento de la mezcla, llevando registros que se le adiciona a un aproximado de 50 millones de toneladas de pavimentos asfálticos por año y siendo obligatoria para algunos Estados la adición de la cal a la mezcla asfáltica, también organizaciones no gubernamentales de común acuerdo con autoridades que regulan el transporte terrestre se han dado a la tarea de hacer investigaciones sobre el uso de la cal en combinación con el asfalto y al aplicarse en carreteras ha dado como

resultado que la adición de cal hidratada reduce el deterioro prematuro y aumenta hasta un 38% la vida útil del pavimento en diferentes condiciones climáticas.

En Europa se han hecho investigaciones las cuales han dado como resultado que la cal hidratada es un muy buen agente que proporciona ventajas a la mezcla asfáltica para ayudar a que las vías de pavimentos flexibles sean más duraderas.

En España se cuenta con la norma *UNE 80503 Cales: Hidróxido de Calcio para utilización en mezclas bituminosas*, esta norma tiene un grado de exigencia similar a la *ASTM C1097-95, Standard Specification for Hydrated Lime for Use in Asphaltic-Concrete Mixtures.* Ambas normas antes mencionadas establecen los métodos de análisis químico a utilizar en la determinación del contenido de las distintas sustancias, de modo que el método de análisis no influya en los resultados y por consiguiente en el cumplimiento o no de la respectiva norma. En México han incorporado en sus normas SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) el uso de la cal hidratada como un agente modificador del asfalto.

Existen reportes de las últimas obras donde se ha utilizado en este país:

- Carretera Cuidad de México-Cuernavaca
- Proyecto Arco Norte
- Segundo piso del periférico D.F
- Circuito Mexiquense
- Reparaciones en carretera México-Puebla
- Patios de Nissan mexicana en Aguascalientes

1.2 Justificación

En Nicaragua como en muchos otros países, existen varios factores que impiden la durabilidad de los pavimentos flexibles.

En diversos países del mundo incluyendo el nuestro, el asfalto es el material más utilizado en la construcción de carreteras. Para cualquier país es de gran importancia contar con una red vial en buenas condiciones capaz de soportar circunstancias extremas a las cuales sean sometidas como: cambios de temperaturas, aumento de tráfico vehicular, agresividad de vehículos pesados etc., es por eso que surge la iniciativa de proponer el Método UCL siendo un procedimiento sencillo, económico y el cual no necesita de equipos especiales para su desarrollo. La aplicación de esta técnica es viable para la solución a dichos problemas.

El Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL), evalúa el comportamiento de los cementos asfálticos y se define mediante las pérdidas por desgaste de las diferentes temperaturas a la que están sometidas cada probeta, valorando así el comportamiento de sus propiedades fundamentales cohesión, adhesividad, durabilidad y susceptibilidad térmica.

Esta metodología es la apropiada para la caracterización de cementos asfálticos, al emplearla brindará la seguridad de saber qué tipo de material y aditivo sea el conveniente para el buen desempeño de los pavimentos.

Es por eso que esta técnica debe ser aplicada al sistema constructivo de pavimentos flexibles siendo lo más viable para el mejor estado de nuestras carreteras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

En este estudio se pretende evaluar las propiedades mecánicas-reológicas de cementos asfálticos y la influencia que en ellos tiene la adición de cal hidratada, mediante una metodología experimental conocida como Método Universal de Caracterización de Ligantes, Método UCL, con la finalidad de conocer el comportamiento y cohesión en diferentes condiciones de trabajo.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Estudiar las características de cementos asfálticos convencionales y modificados con polímeros.

- Evaluar las características de cementos asfálticos convencionales adicionándoles cal hidratada.

- Investigar en los diferentes laboratorios de asfaltos del país si cuentan con los equipos necesarios para la aplicación del Método UCL.

1.4 Metodología de la Investigación

La metodología que se siguió en el presente trabajo monográfico fue básicamente bibliográfica y experimental.

La investigación bibliográfica consistió en la recopilación de la información útil para el desarrollo de este estudio, así como documentación relacionada con cementos asfálticos, mezclas asfálticas, uso de la cal hidratada en la durabilidad de pavimentos flexibles y escritos técnicos basados en la aplicación del Método Universal de Caracterización de Ligantes.

En la segunda parte referente al enfoque metodológico de tipo experimental, se llevó a cabo el reconocimiento de los equipos, se dió lectura al manual de laboratorio para un eficiente desarrollo de los ensayos, los cuales están estipulados por normas internacionales como Secretaría de Comunicación y Transporte (SCT), American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM), American Association of State Highway and Transportation (AASHTO) y Normas Españolas de Laboratorio de Transporte (NLT).

Capítulo 2

Materiales para Mezclas Asfálticas en Caliente

Capítulo 2. Materiales para Mezclas Asfálticas en Caliente

Las mezclas asfálticas para un pavimento están compuestas en un 5% de cemento asfáltico, 90 % de agregado pétreo y 5% de polvo mineral (filler) , este último elemento mencionado persigue un objetivo específico con el fin de que el comportamiento de la mezcla sea el indicado para soportar las diferentes condiciones a la que se expone una capa de pavimento, el comportamiento de dicha mezcla dependerá de la proporción óptima de cada material así como de la calidad de estos componentes, según el tipo de mezcla asfáltica.

Una mezcla asfáltica en caliente es fabricada a temperaturas elevadas, en el rango de 150 °C, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos, la puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario estos materiales no pueden extenderse y menos compactarse adecuadamente.

2.1 Agregado Pétreo

Los agregados pétreos para las mezclas asfálticas se originan de la naturaleza o bien como productos resultantes de otros materiales. Este componente en una mezcla asfáltica juega un papel muy importante ya que constituye entre 85 y 90% en peso de la mezcla, por eso sus propiedades físicas, químicas y mecánicas son significativas en el comportamiento de la mezcla.

Por la calidad y cantidad de agregado pétreo que se utiliza en las mezclas asfálticas es necesario recurrir a un estudio de sus propiedades en un laboratorio. Estos estudios deben seguir criterios establecidos de las normas internacionales.

En dependencia de los fragmentos de agregados gruesos y finos en la granulometría, se adquieren diferentes tipos de mezclas asfálticas.

2.1.1 Basalto

2.1.1.1 Origen

El basalto es una roca ígnea extrusiva, sólida y negra, es el tipo de roca más común en la corteza terrestre y cubre la mayoría del fondo oceánico. El basalto

se forma cuando la lava llega a la superficie de la Tierra proveniente de un volcán o de una cordillera en medio del océano, cuando llega a la superficie, la lava se encuentra a temperaturas que oscilan entre los 1100 a 1250 °C, pero se enfría rápidamente en unos días o un par de semanas, convirtiéndose en roca sólida. La lava muy gruesa puede tardar muchos años en solidificarse totalmente.

2.1.1.2 Historia

Alrededor del año 1800 se gestó una controversia científica en torno al origen del basalto, discípulos y seguidores del geólogo alemán Abraham Gottlob Werner sostenían que el basalto era una roca sedimentaria que tenía su origen en la precipitación en un gran océano ancestral, a esta teoría se le llama (neptunismo) dos bandos se oponían a esta teoría: los seguidores de James Hutton, posteriormente conocidos como (plutonistas), que afirmaban que el basalto era una roca intrusiva, y los (vulcanistas) que consideraban al basalto como una roca volcánica. Algunos de los argumentos de los neptunistas en contra del origen volcánico del basalto era su presencia en lugares como la Calzada del Gigante y Sajonia donde no hay volcanes activos, además de presuntos hallazgos de fósiles en basalto. La confusión que causaba el hallazgo de basalto sin volcanes aparentes también se dió en América, donde Juan Ignacio Molina se percató de los basaltos de Chiloé donde en la actualidad no hay volcanes, descartando así un origen volcánico contra la formación de basalto en erupciones volcánicas, los neptunistas argumentaron que esto se debía más bien a la fusión de basalto neptuniano bajo los volcanes.

Hacia el año 1830 el bando de los neptunistas se había desintegrado, perdiendo la mayoría de sus seguidores, quienes reconocieron el origen volcánico del basalto, en algunos casos gracias a visitas a los volcanes y basaltos de Chaîne des Puys en Francia.

2.1.1.3 Propiedades y uso del basalto

A través de la historia el basalto se ha empleado como material de construcción por diversas culturas, entre ellas los olmecas de México, el Antiguo Egipto, y el pueblo rapanui, por mencionar unas pocas. Hoy en día se utilizan fibras artificiales de basalto para reforzar estructuras de hormigón.

A pesar de ser impermeable, su uso no es aconsejable para ciertas obras hidráulicas debido a su excesiva fracturación, otro defecto es que las superficies

de basalto tienden a formar pequeñas manchas blancas en donde el mineral analcima se ha alterado, posiblemente producto de la radiación solar.

El basalto tiene un coeficiente de dilatación térmica más bajo que el granito, la caliza, la arenisca, la cuarcita, el mármol, o la pizarra, por lo que recibe poco daño en incendios. Dado el bajo albedo de los basaltos, las superficies de esta roca tienden a calentarse más que otras, producto de la radiación solar, llegando a registrar temperaturas de casi 80 °C en el Sahara.

El basalto masivo (sin vesículas) tiene una densidad de 2.8 a 2.9 g/cm³ siendo más denso que el granito y el mármol pero menos que el gabro. En la escala de dureza de Mohs se ha estimado que el basalto tiene una dureza que puede variar de aproximadamente de 4.8 a 6.5.

2.2 Filler

Se han intentado soluciones en el diseño que consisten frecuentemente en aumentar el contenido de asfalto en las mezclas para lograr una película de ligante de mayor espesor envolviendo a los áridos y reducir el porcentaje de vacíos, sin embargo un exceso de betún suele derivar en exudaciones y escurrimientos, además de encarecerse el producto final, por lo usual es que las especificaciones técnicas para obras de pavimentación asfáltica no consideren convenientemente el factor envejecimiento al establecer sus prescripciones, insistiéndose en caracterizar el comportamiento de los ligantes frente a los mecanismos responsables del “endurecimiento por edad” a partir de ensayos empíricos de simulación que únicamente tienen en cuenta el material ligante de forma aislada y no la interacción que se produce con los otros componentes de la mezcla.

Son conocidas las potenciales ventajas del uso de fillers en lo que a resistencia al envejecimiento se refiere, sin embargo, a menudo no se tienen en cuenta otros conceptos asociados al sistema bifásico filler-betún y que influyen sobre una serie de características fundamentales de las mezclas, las Universidades de La Plata, Argentina, y Politécnica de Cataluña, España, realizaron una investigación conjunta con fines de esclarecer algunos fenómenos relacionados con el envejecimiento de los ligantes y de establecer pautas de diseño que contribuyan a optimizar la resistencia al deterioro de las mezclas bituminosas, llegando a la siguiente conclusión sobre la utilización de filler en el asfalto:

- El filler y el asfalto conforman una masa asfáltica o mástico, este compuesto tiene importancia fundamental en la impermeabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica, el mástico proporciona rigidez a la mezcla asfáltica permitiendo que las partículas de agregado permanezcan unidas. En ese trabajo se encontró que entre mayor sea la relación filler/asfalto, mayor es la resistencia a la deformación plástica en el ensayo de Pista.

- El filler es un material no arcilloso que pasa el tamiz No. 200 que tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas debido a que forma parte del esqueleto mineral y soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre las partículas, rellena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos, por lo tanto impermeabiliza y densifica el esqueleto, sustituye parte del asfalto que de otra manera sería necesario para conseguir unos vacíos en mezcla suficientemente bajos.

- Proporciona puntos de contacto entre agregados de mayor tamaño y los encaja limitando sus movimientos, aumentando así la estabilidad del conjunto. Facilita la compactación, actuando a modo de rodamiento entre los agregados más gruesos.

2.2.1 Cal hidratada

2.2.1.1 Historia

El uso de morteros a base de cal data del año 7.000 a.J.C. En la ciudad de Jericó, una de las más importantes del período Neolítico, se han encontrado pavimentos a base de cal con acabados fino y bruñido.

Este hecho conlleva a pensar que en el Neolítico la cal era un material bien conocido, siendo su extracción, calcinación y posterior amasado procesos que se dominaban. El buen estado de conservación de estos morteros de cal se debe a la selección de materiales de gran calidad y a sus adecuadas proporciones en la mezcla, algunos de los ejemplos más singulares de este tipo de suelos se encuentran en el yacimiento neolítico de Yiftah, al sur de Galilea.

En Grecia, los morteros de cal fueron ampliamente utilizados, tanto para la construcción de muros como para los acabados finales, o sea, en estucos y enlucidos. Los morteros generalmente se hacían con arena y cal fina, mientras

que las superficies para decorar con pinturas se realizaban con una mezcla de cal, yeso y polvo de mármol (marmolina).

Los análisis sobre los morteros griegos han mostrado que en muchas ocasiones se les añadían diversas sustancias para modificar sus cualidades de dureza y ductilidad, es en esta época cuando aparecen los primeros morteros hidráulicos mediante la mezcla de cal con polvo de tierra volcánica, procedente de la isla de Santorini.

2.2.1.2 Cal hidratada un componente para la mezcla asfáltica

La incorporación de cal hidratada en la mezcla asfáltica presenta dos funciones principales: como calidad de rellenador (filler) comprimiendo los vacíos existentes en la mezcla debido a la ausencia de material fino y la otra es de modificante ya que provoca la afinidad entre el material asfáltico y el material pétreo, con el fin de que su comportamiento sea el apropiado para las condiciones climatológicas y de tránsito, este criterio de aplicación de cal en la mezcla es establecido en la norma estándar AASHTO M 216 para pavimento y estabilización de suelo.

El ciclo de la cal es el siguiente: empieza en la misma piedra caliza, durante el proceso de cocción su emisión de CO_2 a la atmósfera es muy baja, se convierte en cal viva, que se sumerge en agua (hidratación) transformándose en cal hidratada.

Son muchos los beneficios de la adición de cal hidratada en la mezcla asfáltica, su utilización en pavimentos flexibles se ha venido efectuando en diferentes países y se ha demostrado que ayuda a minimizar el daño que la humedad produce y sobre todo ampliar la vida útil del pavimento.

Hay estudios que revelan que al agregarle cal hidratada al asfalto, reacciona con el árido, consolidando el enlace entre el betún y la roca y a diferencia de otros fillers minerales que son inertes, la cal es químicamente activa. Cuando la cal se dispersa a través de la mezcla, reacciona con el betún, eliminando componentes indeseables mientras que hace que la mezcla asfáltica sea más rígida y resistente a mayores temperaturas, esto da lugar a una mezcla asfáltica que es más resistente a la formación de roderas y al agrietamiento por fatiga, sin embargo, la adición de cal hidratada, no hará que la mezcla llegue a ser más frágil a bajas temperaturas debido a que a bajas temperaturas, la cal hidratada es menos activa químicamente y se comporta como un mineral inerte.

Otro beneficio de esta, es que reduce el índice de envejecimiento del pavimento, retardando la oxidación del betún. Esto es debido a que la cal reacciona con las moléculas altamente polares del betún, retardando su índice de cambio de la química, por lo tanto, el pavimento sigue siendo más flexible a lo largo del tiempo y se protege del agrietamiento frágil durante más años que sin la contribución de la cal.

La filosofía básica se concentra en cambiar de posición los elementos con que contamos en la naturaleza, adoptando nuevas formas que permitan facilitar el aprovechamiento y el desarrollo de la humanidad, es por eso que el uso de la cal en mezclas asfálticas surge como una necesidad de buscar nuevas alternativas y no solo obteniendo la relación beneficio/costo sino también mitigando el impacto ambiental.

2.3 Asfalto

2.3.1 Reseña histórica

El asfalto es uno de los materiales más antiguos que se conocen, resientes excavaciones arqueológicas muestran el extenso uso que se dió al asfalto entre los años 3200 y 540 a. de C. En los valles de Mesopotamia lo usaban como un cementante para la construcción de mampostería y caminos, en otras zonas lo usaban como impermeabilizante para baños y depósitos de agua.

Los egipcios utilizaban ampliamente el asfalto para los tratamientos de preservación y momificación de sus muertos, los nativos de América lo utilizaban para impermeabilizar sus canoas, en México en las costas de Oaxaca lo masticaban para limpiar y blanquear su dentadura.

En 1802 en Francia se utilizó para el terminado superficial de pisos y puentes, en 1838 en filadelfia se usó el asfalto de roca importado para la construcción de banquetas.

En 1870 en Nueva Jersey se colocó el primer pavimento asfáltico utilizando roca asfáltica importada del valle de Ródano en Francia. El diseño lo realizó un químico de origen belga llamado E. J. Desmet.

En 1876 se aplicó la primera capa de mezcla asfáltica en Washington D.C utilizando asfalto importado del lago la trinidad cerca de Venezuela.

Estos asfaltos empleados en los primeros trabajos eran de origen natural, es decir en forma de yacimientos los cuales podían explotarse fácilmente y no requerían de complicadas operaciones industriales.

En la mitad del siglo XIX la demanda del asfalto incrementó y los yacimientos naturales no eran suficiente para cubrir su solicitud por lo que se procedió a la utilización de la destilación del petróleo, en 1886 EE.UU. fue el primer país en implementar este proceso.

2.3.2 Definición

El asfalto es un material viscoso, pegajoso y de color negro. Su consistencia es variable, está constituido mayoritariamente por una mezcla de hidrocarburos pesados. Se encuentra en yacimientos naturales o se obtiene por refinación del petróleo y es usado como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras o autopistas.

2.3.3 Composición

El material asfáltico está formado por sistemas coloidales que influyen en sus características reológicas y mecánicas constituidos por una fase dispersa y otra continua, la fase dispersa está constituida por partículas pesadas y de mayor punto de ebullición llamados asfaltenos que se encuentran dentro de la fase continua formada por un fluido aceitoso de componentes ligeros y de bajo punto de ebullición conocido como maltenos. Generalmente cuando hablamos de asfalto existen mayor proporción de maltenos que de asfaltenos, donde dicho contenido de maltenos es lo que le da la calidad al asfalto, regulando así las propiedades químicas de los asfaltos.

2.3.4 Clasificación

El asfalto se clasifica en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, en la Tabla 1 se detallan sus usos más comunes.

Tabla 1. Clasificación de los materiales asfálticos. Fuente: (SCT, México, 2000)

Material asfáltico	Vehículo para su aplicación	Usos más comunes
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente en 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 en carpetas, mezclas, morteros, riegos y estabilizaciones.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de sub-bases y bases hidráulicas.

2.3.4.1 Cementos asfálticos

Los cementos asfálticos son los que se obtiene por el proceso de destilación del petróleo para la eliminación de solventes volátiles, su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, de manera que al calentarse esta cubre totalmente las partículas del material pétreo.

Para alcanzar el correcto comportamiento de estos cementos asfálticos en la mezcla, es preciso someterlos a algunos procesos que permitan la trabajabilidad de estos, ya que en estado natural el crudo presenta una viscosidad y consistencia que hace esto imposible.

Procesos que permiten la trabajabilidad exitosa de los cementos asfálticos

- Calentamiento del cemento asfáltico a temperatura de 100 hasta 170 °C para bajar su viscosidad y hacerlo más trabajable con el fin de que cubra cada partícula del agregado pétreo.

- Obtención de una emulsión asfáltica este proceso es una mezcla en frío (mezcla asfáltica + agua + emulsionante) a temperatura ambiente.

- Obtención de asfaltos rebajados al diluir un solvente al cemento asfáltico a una temperatura de 60 °C.

Según su viscosidad dinámica a 60 °C, los cementos asfálticos se clasifican como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60 °C. Fuente: (SCT, México, 2000)

Clasificación	Viscosidad a 60ºC Pa-s(P[1])	Usos más comunes
AC-5	50±10 (500±100)	• En la elaboración de carpetas de mezclas en caliente. • 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)	• En la elaboración de carpetas de mezclas en caliente. • 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.
AC-20	200±40 (2000±400)	• En la elaboración de carpetas de mezclas en caliente. • 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.
AC-30	300±60 (3000±600)	• En la elaboración de carpetas de mezclas en caliente. • 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. • En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezclas en frío, así como en riegos de impregnación.

2.3.4.1.1 Requisitos de calidad de los cementos asfálticos

Los cementos asfálticos cumplirán los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Requisitos de calidad de los cementos asfálticos. Fuente: (SCT, México, 2000)

Características	Clasificación			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento asfáltico original:				
Viscosidad dinámica a 60 ºC; Pa-s (P [1])	50±10 (500±100)	100±20 (1000±200)	200±40 (2000±400)	300±60 (3000±600)
Viscosidad cinemática a 135 ºC; mm^2/s, mínimo ($1mm^2/s$ = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 ºC; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25 ºC, 100g, 5s; 10-1 mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; ºC, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad; %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento; ºC	37-43	45-52	48-56	50-58
Del residuo de la prueba de la película delgada:				
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1	0.5	0.5	0.5
Viscosidad dinámica a 60 ºC; Pa-s(P [1]), máximo	200 (2000)	400 (400)	800 (8000)	1200 (12000)
Ductilidad a 25 ºC y 5 cm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25 ºC; % mínimo	46	50	54	58

2.3.4.1.2 Tipos de cementos asfálticos

Cementos asfálticos convencionales

Se define al asfalto de petróleo como una sustancia sólida o semisólida de características adhesivas a temperatura conveniente, obtenido como residuo de la destilación conservativa o destructiva de petróleos de base asfáltica o mixta,

y que se adapta por tratamientos apropiados a los usos especiales a que se destine.

Para determinar las características de los cementos asfálticos, así como su comportamiento, existen ensayos de laboratorio que tienen por objeto dar a conocer las propiedades, tanto físicas como mecánicas sometidos a esfuerzos y a temperaturas extremas, según sea el caso.

Los asfaltos convencionales poseen propiedades convenientes de adhesión en una extensa gama de utilidades y bajo distintas condiciones climáticas.

Cementos asfálticos modificados con polímeros

Los asfaltos modificados fueron utilizados primeramente en las emulsiones como impermeabilizantes y luego empezaron a usarse en la pavimentación, en riegos como tratamientos superficiales en frío, para luego comenzar a modificar los cementos asfálticos cuando se requiriera un asfalto de mejor calidad o mayor resistencia.

Estos cementos asfálticos son el producto de la disolución en el asfalto de hule molido de neumático (polímero), siendo sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, modificando así sus propiedades físicas y reológicas.

Los modificadores producen una actividad superficial iónica que incrementa la adherencia entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aún en presencia de agua, a su vez aumentan la resistencia de la mezcla asfáltica a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga, reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura, generalmente se aplican directamente al material asfáltico antes de mezclarlo con el material pétreo.

Definición de polímero

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

Modificadores poliméricos

Homopolímeros: Que tienen una sola unidad estructural (monómero).

Copolímeros: Tienen varias unidades estructurales distintas. (Ejemplos: EVA, SBS)
Plastómeros: Al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la solicitación, tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad.

Dentro de estos tenemos:

- EVA: Etileno-Acetato de Vinilo.
- EMA: Etileno-Acrilato de Metilo.
- PE: (Polietileno) tiene buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, como también buen comportamiento a bajas temperaturas.
- PP: (Polipropileno).
- Poliestireno: No son casi usados.

Elastómeros: Al estirarlos, a diferencia de los anteriores, estos vuelven a su posición original, es decir, son elásticos.

Dentro de estos tenemos:

- Natural: Caucho natural, celulosa, glucosa, sacarosa, ceras y arcillas son ejemplos de polímeros orgánicos e inorgánicos naturales.
- SBR: Cauchos sintéticos del 25% de Estireno y 75% de Butadieno; para mejorar su adhesividad se le incorpora ácido acrílico.
- EPDM: (Polipropileno atáctico) es muy flexible y resistente al calor y a los agentes químicos.
- ***SBS:*** *(Estireno-Butadieno-Estireno) o caucho termoplástico. Este polímero SBS es el más utilizado para la modificación de asfaltos, ya que este es el que mejor comportamiento tiene durante la vida útil de la mezcla asfáltica.*

Termoendurecibles: Estos tienen muchos enlaces transversales que impiden que puedan volver a ablandarse al calentarse nuevamente. Son ejemplos de estos las resinas epóxi; estas se usan en grandes porcentajes, mayores al 20%, son muy costosas y se utilizan para casos especiales. (Ejemplo: Playa de camiones)

Grado de desempeño (PG)

La clasificación PG complementada con la clasificación de asfaltos modificados con polímeros si es el caso, es la que actualmente proporciona mejores indicadores del comportamiento del asfalto medido en laboratorio versus el desempeño en campo y la prueba principal es la reología (propiedades visco-elásticas) que se realiza a las temperaturas de trabajo esperadas. Esta clasificación considera las dos principales variables que afectan el desempeño del asfalto en obra: temperatura del pavimento y tránsito.

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

Los grados PG de alto desempeño se rigen por el método SUPERPAVE (**SU**perior **PER**forming Asphalt **PAVE**ments). [5]

Un ejemplo de cemento asfáltico de grado de desempeño PG es el utilizado en este estudio, AC-20 modificado con polímero SBS corresponde a un PG 76-22, indica que éste tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como 76 °C y tan bajas como -22 °C, presentando un mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica.

Capítulo 3

Métodos Convencionales de Caracterización de Asfaltos

Capítulo 3. Métodos Convencionales de Caracterización de Asfaltos

Este capítulo aborda los métodos de ensayos que se deben aplicar a los cementos asfálticos para confirmar si tienen las características apropiadas para su uso. Son extraídos de las Normas Españolas para Carreteras, NLT y Normas de la Secretaria de Comunicaciones y Transporte de México, SCT, equivalentes a los publicados en los manuales de la American Society for Testing and Materials, ASTM y la American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO.

3.1 Densidad (ASTM D70, SCT M-MMP-4-04-003-02)

3.1.1 Contenido

Se describe el procedimiento de prueba para determinar la densidad de los cementos asfálticos.

3.1.2 Objetivo

Esta prueba permite determinar el peso específico relativo o densidad de los cementos asfálticos, que es la relación entre el peso de un volumen dado del material a 25 °C y el peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura. Este dato se utiliza en el cálculo de volúmenes de los cementos asfálticos y en la determinación del porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas compactadas.

3.1.3 Equipo

El equipo necesario es el siguiente:

- Picnómetro de vidrio, de forma cilíndrica, o cónica, de 22 a 26 mm de diámetro, con tapón de vidrio esmerilado, provisto de un orificio central de 1 a 2 mm de diámetro. La superficie superior del tapón debe ser lisa y plana y la inferior cóncava para permitir que escape todo el aire a través del orificio. La altura en el centro de la sección cóncava debe estar compendia entre 4 y 6 mm. El picnómetro tapado debe tener una capacidad de 24 a 30 cm^3 y no debe pesar más de 40 g (Ver Figura 1).

- Termómetro de inmersión total, con escala que abarque de -8 a 32 °C y aproximación de 0.1 °C.
- Balanza con aproximación de 1 miligramo.
- Vaso de precipitado de 500 cm^3.
- Vaso de precipitado de 250 cm^3.
- Baño de agua que permita regular la temperatura hasta 50 °C, con aproximación de 0.1 °C.
- Fuente de calor.
- Agua destilada.

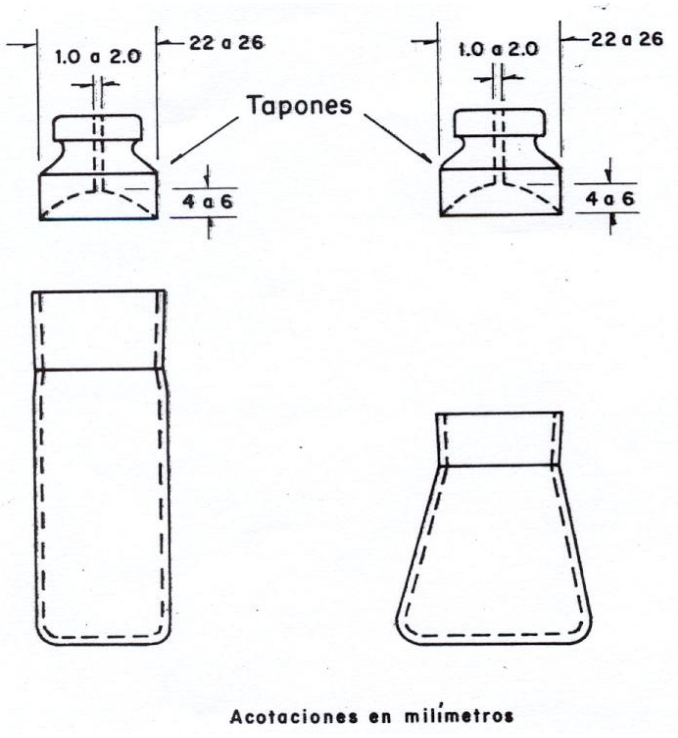


Figura 1. Picnómetros. Fuente: (SCT, México, 2000)

3.1.4 Procedimiento

- Se limpian y secan perfectamente el picnómetro y el tapón, y a continuación se pesan conjuntamente, anotando este peso como W_f, con aproximación de 0.001 g.

- Se llena el picnómetro con agua destilada, recientemente hervida para eliminarle el aire, se le inserta firmemente el tapón y se sumerge todo el conjunto, durante no menos de 30 minutos, en un vaso con agua destilada que se mantendrá a 25 $\pm$ 0.2 °C dentro del baño de agua. A continuación se saca parcialmente el picnómetro del agua y se procede a secar la superficie exterior del tapón, cuidando que el orificio quede totalmente lleno de agua. Enseguida se saca completamente el picnómetro del vaso y con un paño seco y limpio se elimina rápidamente la humedad que tenga la superficie exterior del mismo, inmediatamente después se pesa el picnómetro con su tapón y el agua que contiene, y se anota este peso como W_{fw}, con aproximación de 0.001 g, efectuado lo anterior, se elimina el contenido del picnómetro y se procede a limpiarlo y a secarlo.

- Se fluidifican en un vaso de precipitado 100 g de cemento asfáltico aproximadamente, aplicando calor en forma lenta y evitando que haya pérdida por evaporación. Cuando la muestra esté suficientemente fluida, se calienta ligeramente el picnómetro y enseguida se vierte en éste una cantidad de cemento asfáltico, suficiente para llenarlo hasta la mitad aproximadamente, sin que el cemento asfáltico escurra por sus paredes y procurando que no se formen burbujas. A continuación, se dejan enfriar el picnómetro y su contenido a la temperatura ambiente y se pesan junto con el tapón, anotando este peso como W_{fa}, con aproximación de 0.001 g.

- Enseguida se termina de llenar el picnómetro con agua destilada y sin aire, y se le inserta firmemente el tapón. El picnómetro y su contenido se sumergen completamente durante no menos de 30 minutos, en un vaso con agua destilada que se mantiene a 25 $\pm$ 0.2 °C dentro del baño de agua. A continuación se saca parcialmente del agua el picnómetro y se seca la superficie exterior del tapón, cuidando que el orificio quede completamente lleno de agua. Enseguida se saca totalmente el picnómetro del vaso y con un paño seco y limpio se elimina rápidamente toda la humedad de la superficie exterior del mismo, inmediatamente se

pesa el picnómetro con su contenido y el tapón, anotando este peso como W_{faw}, con aproximación de 0.001 g.

3.1.5 Cálculos

Se calcula y se reporta el peso específico relativo del cemento asfáltico con aproximación de 0.001 g, determinado con la siguiente fórmula:

$$S_{CA} = \frac{W_{fa} - W_f}{(W_{fw} - W_f) - (W_{faw} - W_{fa})} = \frac{W_a}{W_w} \qquad \textbf{Ec. (1)}$$

En donde:

S_{CA}: es el peso específico relativo o densidad del cemento asfáltico, número abstracto.

W_f: es el peso del picnómetro, en g

W_{fw}: es el peso del picnómetro lleno de agua, en g

W_{fa}: es el peso del picnómetro con asfalto, en g

W_{faw}: es el peso del picnómetro con asfalto y agua, en g

W_a: es el peso del picnómetro con asfalto contenido en el picnómetro, en g

W_w: es el peso del agua destilada, en g, correspondiente a un volumen igual al del cemento asfáltico, estando ambos a 25 °C

3.1.6 Precauciones para evitar errores

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

- El agua destilada que se utilice debe ser hervida poco antes de la prueba, con objeto de extraerle el aire que contenga.

- Al limpiar y secar superficialmente el picnómetro, debe evitarse aumentar su temperatura con el calor de la mano, ya que podría originar que se dilate y derrame su contenido.

- Al llenar el picnómetro e insertar el tapón, deben eliminarse todas las burbujas de aire.

- Para efectuar la limpieza del picnómetro después de una determinación, es conveniente calentarlo a no más de 100 °C, hasta que casi todo el material pueda ser vaciado, para limpiarlo después con un paño suave. Una vez que se haya enfriado el picnómetro se puede terminar su limpieza con un disolvente apropiado, secándolo firmemente con otro paño.

3.2 Penetración (ASTM D5, AASHTO T49, SCT M-MMP-4-05-006-00)

3.2.1 Contenido

Se describe el procedimiento de prueba para determinar la consistencia de los materiales asfálticos.

3.2.2 Objetivo

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.

3.2.3 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.

Aparato de penetración o penetrómetro para asfaltos

Como el mostrado en la Figura 2, capaz de sujetar una aguja como las referidas en el siguiente apartado (Agujas) 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.

.

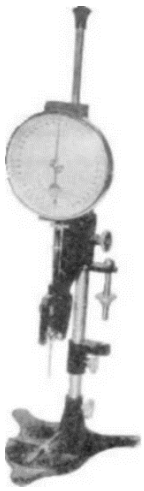
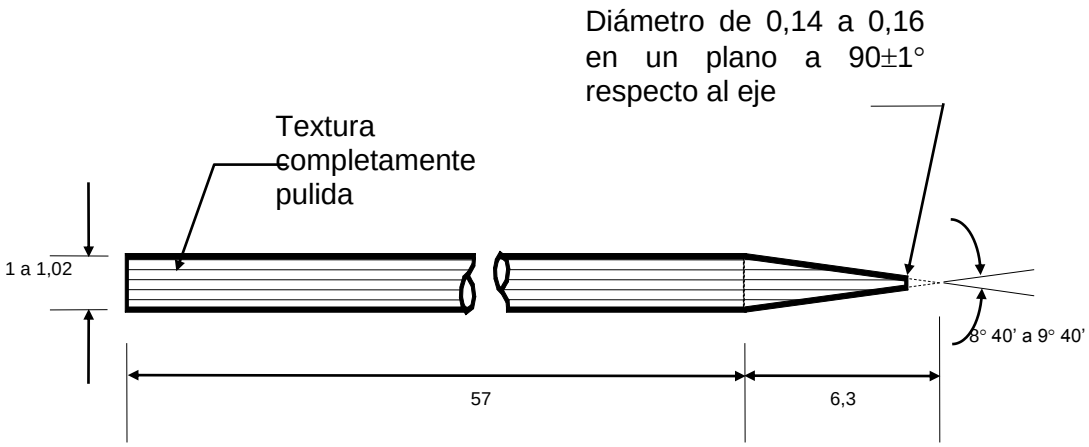


Figura 2. Penetrómetro para la prueba de penetración. Fuente: (SCT, México, 2000)

Agujas

De acero inoxidable, totalmente endurecidas y perfectamente pulidas, con la forma y dimensiones que se muestran en la Figura 3, que se acoplen al penetrómetro mediante un casquillo de bronce o de acero inoxidable, sobresaliendo de éste último entre 40 y 45 mm.



Acotaciones en mm

Figura 3. Aguja para la prueba de penetración. Fuente: (SCT, México, 2000)

Cápsula de penetración

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

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.

Termómetro

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

Cronómetro

Con aproximación de 0.2 s.

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 la muestra se mueva durante el proceso de ensaye.

Malla No. 50

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

Espátula de níquel

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

3.2.4 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:

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 minutos. 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.

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 No. 50, se cubre adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.

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.

3.2.5 Procedimiento

La prueba se realiza en la forma siguiente:

- 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 horas, con objeto de que el producto asfáltico adquiera esa temperatura.

- 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 ± 0.1 g o la masa que se especifique para la prueba y finalmente se nivela perfectamente el penetrómetro.

- 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.

- 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 segundos o durante el tiempo que se especifique para la prueba, después de lo cual se toma la lectura registrándola en décimos de milímetro.

- 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.

- Para materiales asfálticos suaves, con penetraciones mayores de 225 × 10^{-1} mm, se tienen que emplear por lo menos 3 agujas, las que se deben ir dejando introducidas en la muestra de prueba al hacer las penetraciones.

3.2.6 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 4, 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.

3.2.7 Precauciones para evitar errores

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

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

Tabla 4. Diferencias permisibles entre los valores de penetración considerados para el cálculo de resultados. Fuente: (SCT, México, 2000)

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

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

3.3 Punto de Reblandecimiento Anillo y Bola (ASTM D36, SCT M-MMP-4-05-009-00)

3.3.1 Contenido

Se describe el procedimiento de prueba para determinar el punto de reblandecimiento por el método del anillo y la esfera, de los cementos asfálticos.

3.3.2 Objetivo

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.

3.3.3 Equipo y materiales

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. Todos los materiales deben ser de calidad y emplearse dentro de la fecha de caducidad. El equipo y los materiales necesarios son los siguientes:

Anillos

Dos anillos de latón, con el diseño y dimensiones señalados en la Figura 4.

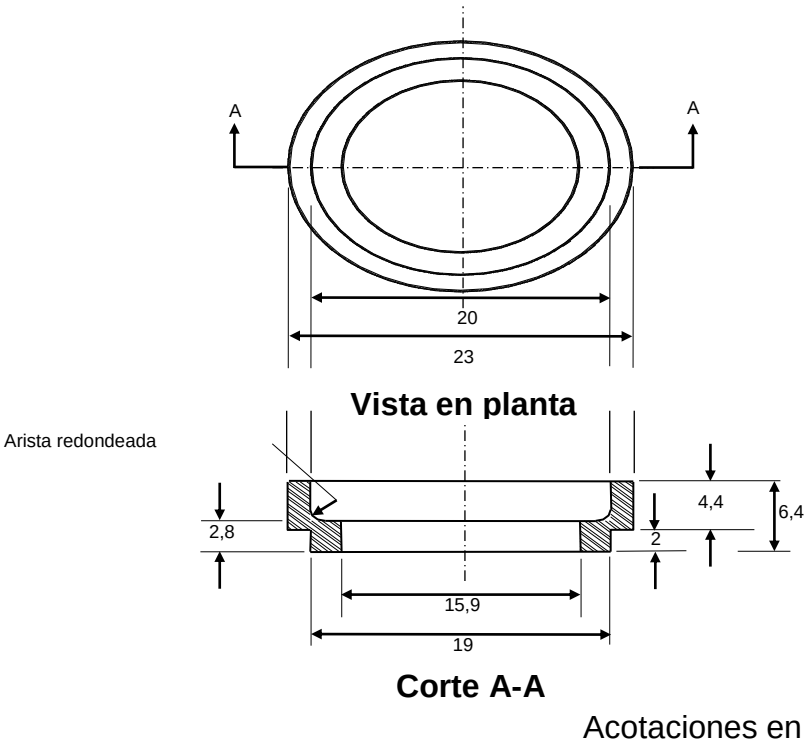


Figura 4. Anillo para la prueba de punto de reblandecimiento. Fuente: (SCT, México, 2000)

Vaso de refractario

Sistema de soporte

Un portanillos de latón, con la forma y dimensiones señaladas en la Figura 5, 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 $\pm$ 3 mm del fondo del vaso, como se muestra en la Figura 6.

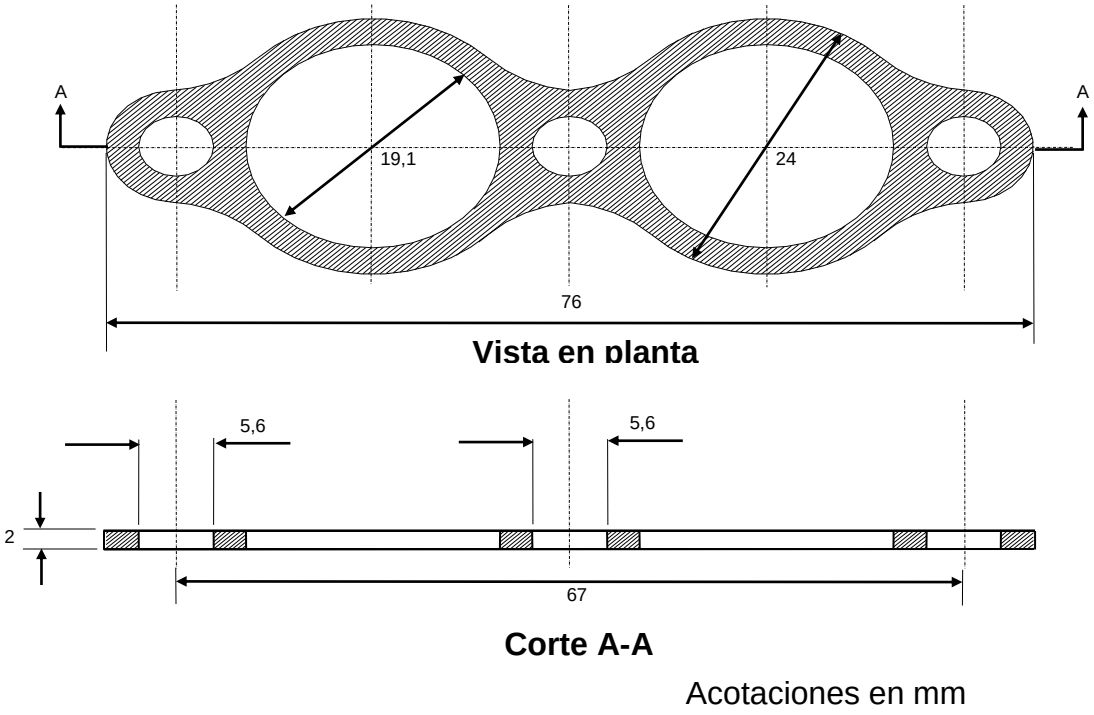


Figura 5. Portanillos para la prueba de punto de reblandecimiento. Fuente: (SCT, México, 2000)

Esferas

Dos esferas de acero, de 9.5 mm de diámetro y de 3.5 ± 0.05 g de masa.

Guías

Dos guías de latón para centrar las esferas, con la forma y dimensiones mostradas en la Figura 7.

Placa de apoyo

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

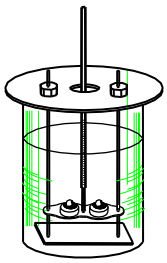


Figura 6. Montaje del sistema de soporte. Fuente: (SCT, México, 2000)

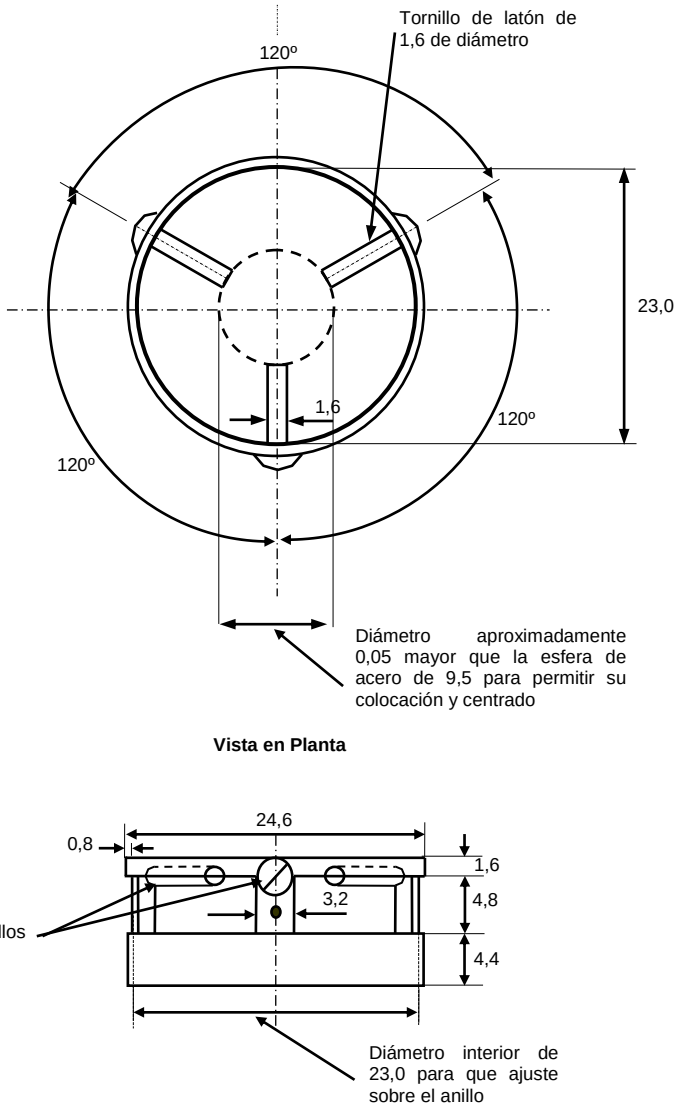


Figura 7. Guía para centrar la esfera. Fuente: (SCT, México, 2000)

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.

Termómetro

De inmersión total con escala rango de -1 a 175 °C y aproximación de 0.5 °C.

Pinzas

Adecuadas para manejar las esferas.

Espátula o cuchillo

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

Agua limpia o glicerina

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

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.

Paño

Para aplicar el antiadherente en la placa de apoyo.

3.3.4 Preparación de la muestra

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

- 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.

- 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 minutos 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.

3.3.5 Ejecución del ensayo

- 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 ± 1 °C si el punto de reblandecimiento esperado es menor de 80 °C o glicerina a 30 ± 1 °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 minutos, manteniéndolo a la temperatura indicada para el líquido que se utilice, introduciendo el vaso en agua helada si es necesario.

- 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 6.

- Se coloca el conjunto en la parrilla eléctrica o mechero y se incrementa uniformemente la temperatura del líquido a razón de 5 °C/min, con una tolerancia ± 0.5°C en lecturas hechas cada minuto después de los primeros 3 minutos.

- Se registra para cada anillo la temperatura en el momento en que el material asfáltico toque la placa inferior del soporte, con aproximación de ± 0.5°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.

3.3.6 Resultados

Se reporta como punto de reblandecimiento del cemento asfáltico el promedio de las temperaturas registradas, con aproximación de 0.5° C, indicando el líquido utilizado para la prueba.

3.3.7 Recomendaciones para evitar errores

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

- 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.
- Realizar la prueba en un local libre de corrientes de aire.
- 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.
- Evitar durante la prueba que la temperatura se eleve en incrementos diferentes al especificado.
- 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.

3.4 Índice de Penetración del Asfalto (NLT-181/88)

3.4.1 Contenido

Se describe el procedimiento de prueba para determinar el índice de penetración de material asfáltico.

3.4.2 Objetivo

Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación del índice de penetración, IP, del asfalto.

Este índice concebido por Pfeiffer y Van Doormal, se calcula a partir de los valores de la penetración y del punto de reblandecimiento anillo y bola y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad de estos materiales a los cambios de temperatura y de su comportamiento reológico.

3.4.3 Fundamento y cálculo

El fundamento del método de obtención del IP se basa en admitir por un lado que a la temperatura del punto de reblandecimiento anillo y bola la penetración de un betún es de 800, y por otro que los valores de la penetración en función de la temperatura se representan por una línea recta, si se elige en ordenadas una escala logarítmica para la penetración.

El cálculo del IP se obtiene mediante la expresión:

$$IP = \frac{20u - 300v}{u + 30v} \qquad \textbf{Ec.}\ (2)$$

Dónde:

u = log 4 (t_{AB} - t_p)

v = log 800 – log P_t

t_{AB} = temperatura del punto de reblandecimiento anillo y bola en °C

t_p = temperatura a la que se efectúa la penetración en °C

P_t = penetración a la temperatura t_p

El resultado se redondea a la primera cifra decimal.

Nomograma. Si las características del ensayo de penetración son las normalizadas de: 0.98 N (100 g), 25 °C y 5 s, el cálculo del IP puede obtenerse gráficamente mediante el nomograma que se incluye en esta norma. Ver Figura 8.

Valores límites. En función del IP se puede clasificar los betunes de forma general, en 3 tipos:

- **IP> +1:** son betunes con poca susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta elasticidad y tixotropía. Se les denomina tipo gel o soplado, ya que la mayoría de los betunes oxidados pertenecen a este grupo.

- **IP< -1:** Betunes con mayor susceptibilidad a la temperatura, ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso.

- **IP entre +1 y -1:** Características intermedias entre los dos anteriores: pertenecen a este grupo la mayoría de los betunes que se utilizan en la construcción de carreteras, al ser esto el intervalo del valor IP que recogen la mayoría de los pliegos de prescripciones.

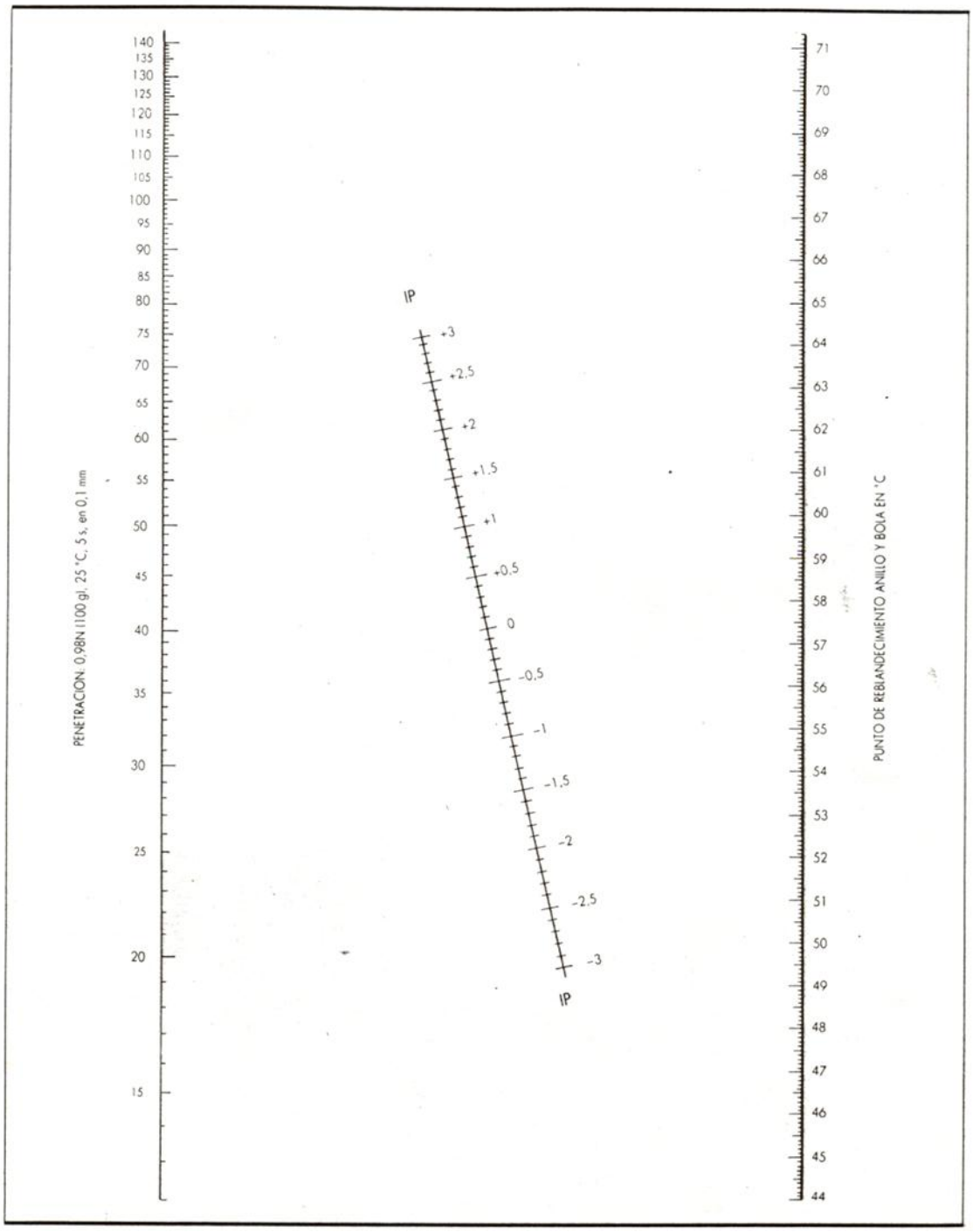


Figura 8. Nomograma para el cálculo del índice de penetración. Fuente: (NLT, España)

3.5 Ductilidad (ASTM D113, AASHTO T51, SCT M-MMP-4-05-011-07)

3.5.1 Contenido

Se describe el procedimiento de prueba para determinar la ductilidad de los materiales asfálticos.

3.5.2 Objetivo

Esta prueba permite determinar la capacidad para deformarse sin romperse, de los cementos asfálticos, del residuo de la prueba de película delgada y de los residuos asfálticos obtenidos por destilación de emulsiones. La prueba consiste en medir la máxima distancia a la cual una briqueta de dichos materiales, de geometría y bajo condiciones de temperatura y velocidad de deformación específicas, puede ser estirada sin romperse.

3.5.3 Equipo y materiales

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. Todos los materiales deben ser de calidad y emplearse dentro de la fecha de caducidad.

El equipo y los materiales necesarios son:

Ductilómetro

Como el mostrado en la Figura 9, constituido fundamentalmente por un dispositivo para estirar la briqueta de cemento 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 del nivel del agua y del fondo del tanque.



Figura 9. Ductilómetro. Fuente: (SCT, México, 2000)

Molde

Para elaborar la briqueta, de latón, compuesto de dos mordazas y dos elementos laterales, con la forma y dimensiones mostradas en la Figura 10.

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.

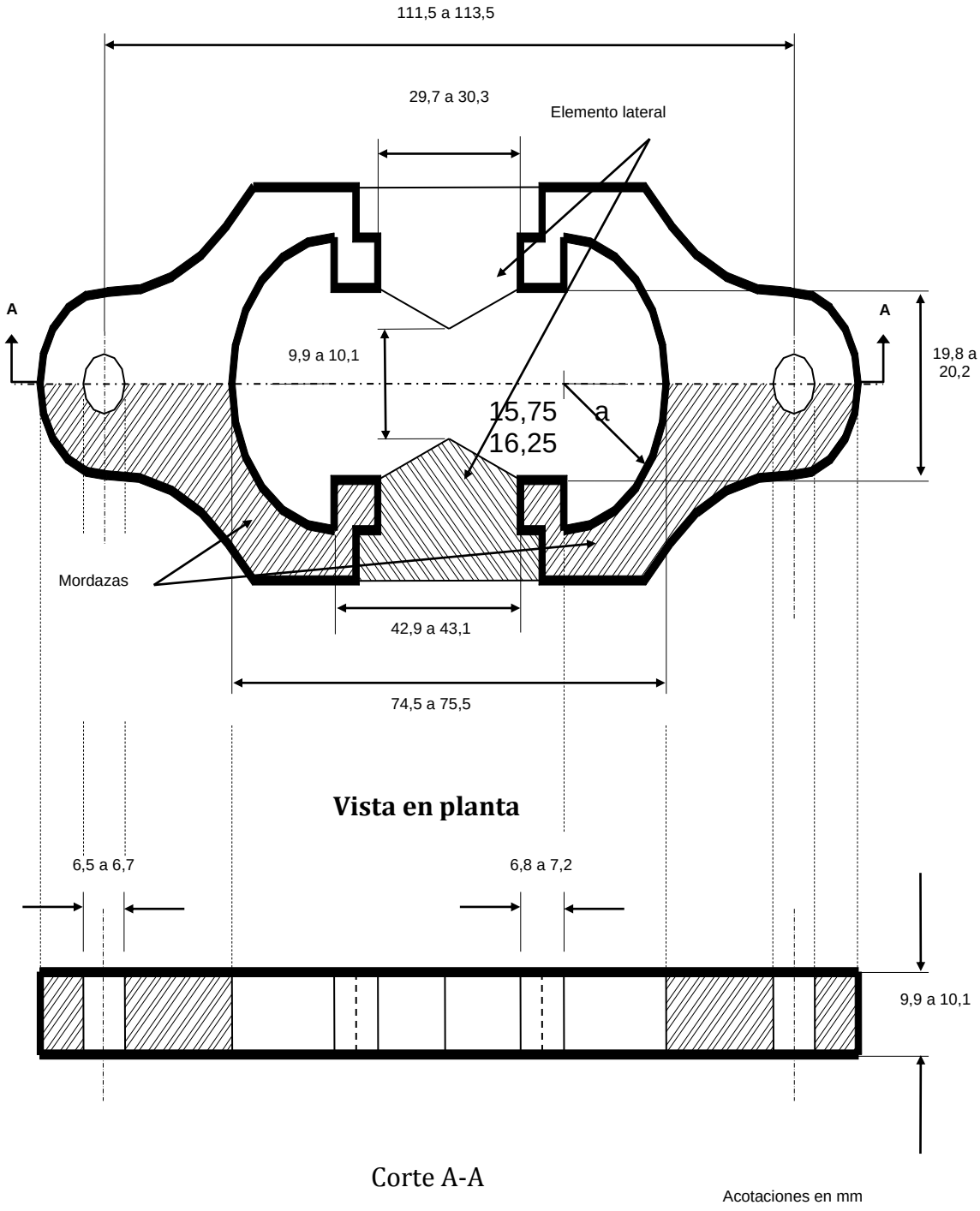


Figura 10. Molde para elaborar la briqueta. Fuente: (SCT, México, 2000)

Baño de agua

Que permita mantener la temperatura a 25 ± 0.5 °C, con una capacidad mínima de 10 L. Debe estar 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.

Termómetro

Con rango de -8 a 32 °C y aproximación de 0.1 °C.

Malla No. 50

De 300 µm de abertura.

Espátula de níquel

De borde recto y 20 cm de longitud.

Cloruro de sodio

De uso comercial.

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.

Paño

Para aplicar el antiadherente en la placa de apoyo.

3.5.4 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 asfalto. 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 de cemento asfáltico, del residuo de la prueba de película delgada o del residuo asfáltico obtenido por destilación de una emulsión, se prepara como se indica a continuación:

Muestra de cemento asfáltico o del residuo de película delgada

De la muestra de cemento asfáltico, se toma un volumen ligeramente mayor al necesario para llenar el molde de la briqueta 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 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 minutos. Hecho esto, inmediatamente se llena el molde previamente preparado, para hacer la briqueta, pasando la muestra de prueba por la malla No. 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 y evitando la formación de burbujas de aire. Finalmente se cubre adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar durante 30 a 40 minutos hasta que alcance la temperatura ambiente.

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 elabora una briqueta llenando el molde previamente preparado, haciendo pasar la muestra de prueba por la malla No. 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 y evitando la formación de burbujas de aire. Finalmente se cubre adecuadamente para protegerla del polvo y se deja enfriar durante 30 a 40 minutos hasta que alcance la temperatura ambiente.

3.5.5 Procedimiento

La prueba se realiza en la forma siguiente:

- El molde con la placa de apoyo, conteniendo la briqueta, se coloca dentro del baño de agua, a una temperatura de 25 $\pm$ 0.5 °C, durante 30 minutos; 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 $\pm$ 5 minutos.

- A continuación se retira la briqueta de la placa quitando los elementos laterales del molde y de inmediato se instala con sus mordazas en el ductilómetro previamente preparado con agua a 25 ± 0.5 °C, sujetando los extremos de éstas en los postes o ganchos del aparato, debiendo quedar la cara superior de la briqueta a no menos de 2.5 cm de la superficie. Durante la prueba se debe mantener el agua a la temperatura indicada.

- Se pone en marcha el mecanismo de prueba a una velocidad de 5 cm/min, con una variación de ±5%, hasta producir la ruptura de la briqueta; en este momento se lee el desplazamiento de la mordaza y se registra en cm.

3.5.6 Resultados

Se reporta como resultado de la prueba la longitud que se desplazó la mordaza para lograr la ruptura de la briqueta, en centímetros con aproximación a la unidad.

3.5.7 Precauciones para evitar errores

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

- Tener especial cuidado en realizar la prueba bajo las condiciones de temperatura que se indican.

- Cuidar que durante el llenado del molde de la briqueta no se generen burbujas de aire en la superficie o en el interior de la muestra de prueba.

- Procurar que al estirarse la briqueta ésta no toque el fondo del tanque del ductilómetro o la superficie de agua, de lo contrario, se debe repetir la prueba agregándole cloruro de sodio al agua del tanque para aumentar su densidad y lograr que la briqueta al ser estirada se mantenga en posición sensiblemente horizontal.

3.6 Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos (ASTM D4402, SCT M-MMP-4-05-005-02)

3.6.1 Contenido

Se describe el procedimiento de prueba para determinar la viscosidad rotacional Brookfield de los cementos asfálticos.

3.6.2 Objetivo

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.

3.6.3 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 11 y cuenta con:

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



Figura 11. Viscosímetro digital Brookfield.

3.6.4 Preparación del equipo

- Previamente a la realización de la prueba, el equipo estará debidamente calibrado, considerando las instrucciones del fabricante.

- Se selecciona el rotor adecuado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y se coloca éste en la cámara de prueba.

- 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.

- Se retira la cámara de prueba y se vierte en ella la muestra.

3.6.5 Preparación de la muestra

La preparación de la muestra de cemento asfáltico, obtenida según se establece en el Manual M·MMP·4·05·001, Muestreo de Materiales Asfálticos, SCT, se hace de la siguiente manera:

- Se evita el sobrecalentamiento de la muestra o su inflamación.

- 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.

- 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.

- Se agita suficientemente la muestra para homogeneizarla.

3.6.6 Procedimiento

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.

- Una vez preparada la muestra, se coloca de nuevo la cámara de prueba en el contenedor térmico.

- 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.

- Se deja reposar la muestra de prueba aproximadamente 15 minutos, para permitir que se equilibre su temperatura.

- 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.

- 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, como se indica en el tercer punto contenido en la "*preparación de la muestra"*. Cuando la lectura esté entre 2 y 98, se registran las lecturas como se indica en el punto anterior.

3.6.7 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.

3.6.8 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.

- Verificar que el equipo esté calibrado de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

- Mantener constante la velocidad del rotor durante la lectura de las mediciones.

- 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.

3.7 Recuperación Elástica por Torsión (SCT M-MMP-4-05-024-02)

3.7.1 Contenido

Se describe el procedimiento de prueba para determinar el grado de elasticidad de los materiales asfálticos.

3.7.2 Objetivo

Esta prueba permite determinar la recuperación elástica de los materiales asfálticos, mediante el uso de un dispositivo de torsión.

3.7.3 Equipo y materiales

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:

Aparato de torsión

Para imponer un esfuerzo de torsión a la muestra, con la forma y dimensiones mostradas en las Figuras 12 y 13. Constituido fundamentalmente por:

- Cilindro metálico
- Semicorona con escala graduada de 0 a 180°
- Baño de agua
- Molde para la muestra.

Termómetro

Sirve para controlar la temperatura del baño de agua. Con rango de 19 a 27 °C y aproximación de 0.1 °C.

Cronómetro

Con aproximación de 1 s.

Estufa

Para calentar la muestra.

Varilla

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

Espátula

Metálica, para agitar la muestra.

Recipiente

De un material resistente al calor

Malla No. 50

De 300 µm de abertura.

3.7.4 Procedimiento

- Se adoptan todas las medidas y precauciones necesarias para que la porción de la muestra para ensayo sea representativa de la muestra de laboratorio, que a su vez presentará aspecto homogéneo y no estará contaminada.

- Una cantidad suficiente de la muestra de laboratorio se calienta con cuidado y con agitación continua hasta conseguir una consistencia de la misma que permita su vertido.

- Se ajusta el cilindro del aparato de torsión de forma que su base inferior quede a una distancia de 20 mm del fondo del recipiente para ensayo situado en posición centrada, ajustando en el resalte que para tal fin se dispone del fondo del baño.

- Se transfiere, por vertido, la muestra al recipiente de ensayo en cantidad bastante para enrasarla con la marca grabada de que dispone el cilindro a 10 mm de su base inferior.

- Se deja enfriar el conjunto recipiente-muestra, a temperatura ambiente, durante 1 hora como mínimo. A continuación se hace circular agua por el

baño termostático a temperatura de 25 ± 0.1 °C, durante al menos 90 minutos, para equilibrar la temperatura del agua del baño y de la muestra. El nivel del agua en el baño estará suficientemente por encima del recipiente con la muestra.

- Transcurridos los 90 minutos antes referidos, se introduce el pasador en el alojamiento que al efecto tiene el cilindro y con su ayuda se hace girar éste 180° en sentido de las agujas del reloj desde 180 a 0°, en un tiempo comprendido entre 3 y 5 segundos. Inmediatamente se retira de su alojamiento el pasador y después de 30 minutos ± 15 segundos, se procede a la lectura indicada por la varilla sobre la semicorona graduada. La lectura al final del ensayo es el valor del ángulo recuperado.

3.7.5 Cálculos y resultados

- El resultado del ensayo se expresa como recuperación elástica por torsión, el porcentaje del ángulo recuperado con respecto al inicial de 180°.

Recuperación elástica por torsión:

$$\mathrm{Re}_t = \frac{L}{180} * 100 \qquad \textbf{Ec.}\ (3)$$

Donde

L = Ángulo recuperado, (°)

- No se ha determinado la precisión del ensaye.

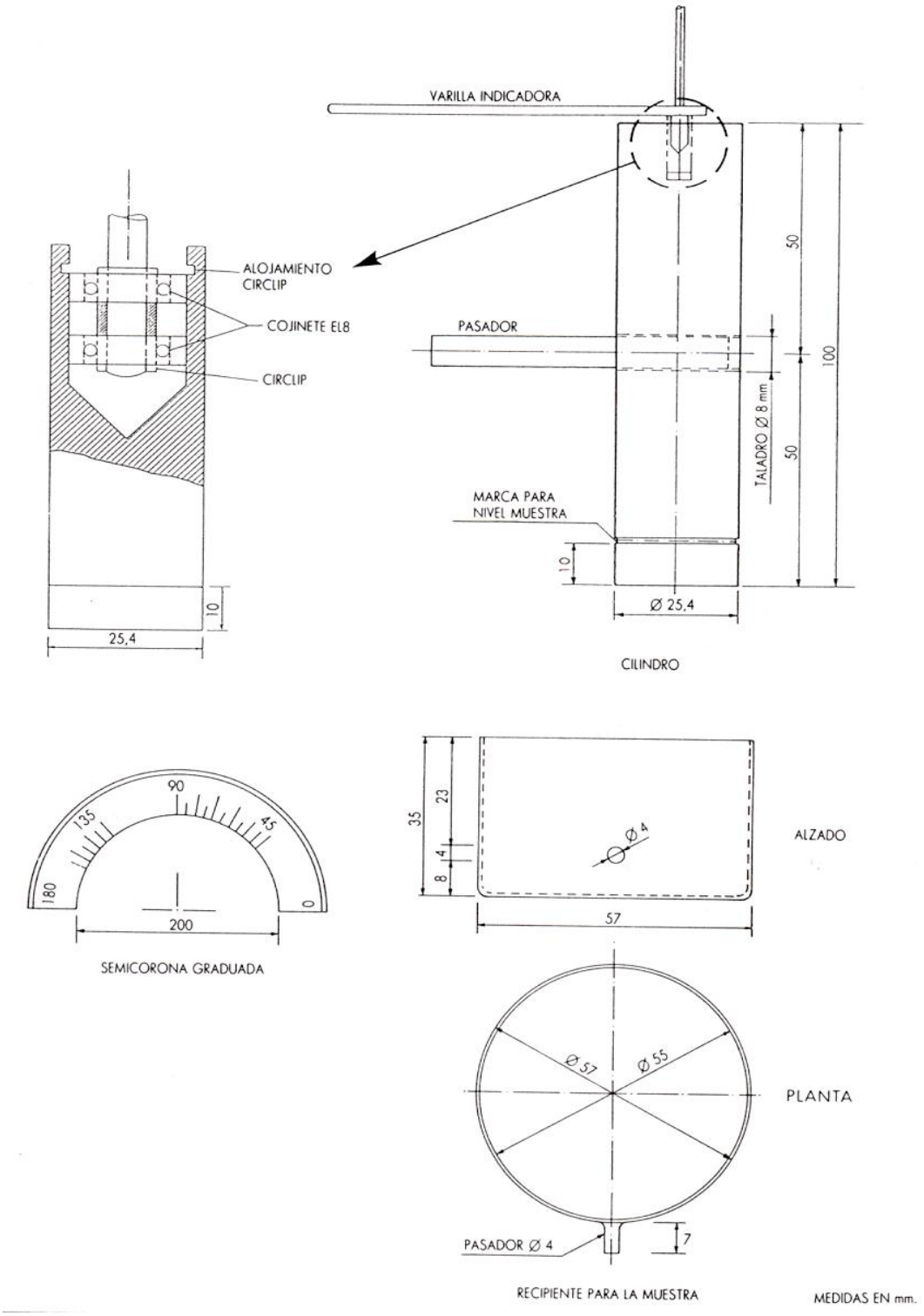


Figura 12. Cilindro, semicorona graduada y recipiente para la muestra. Fuente: (SCT, México, 2000)

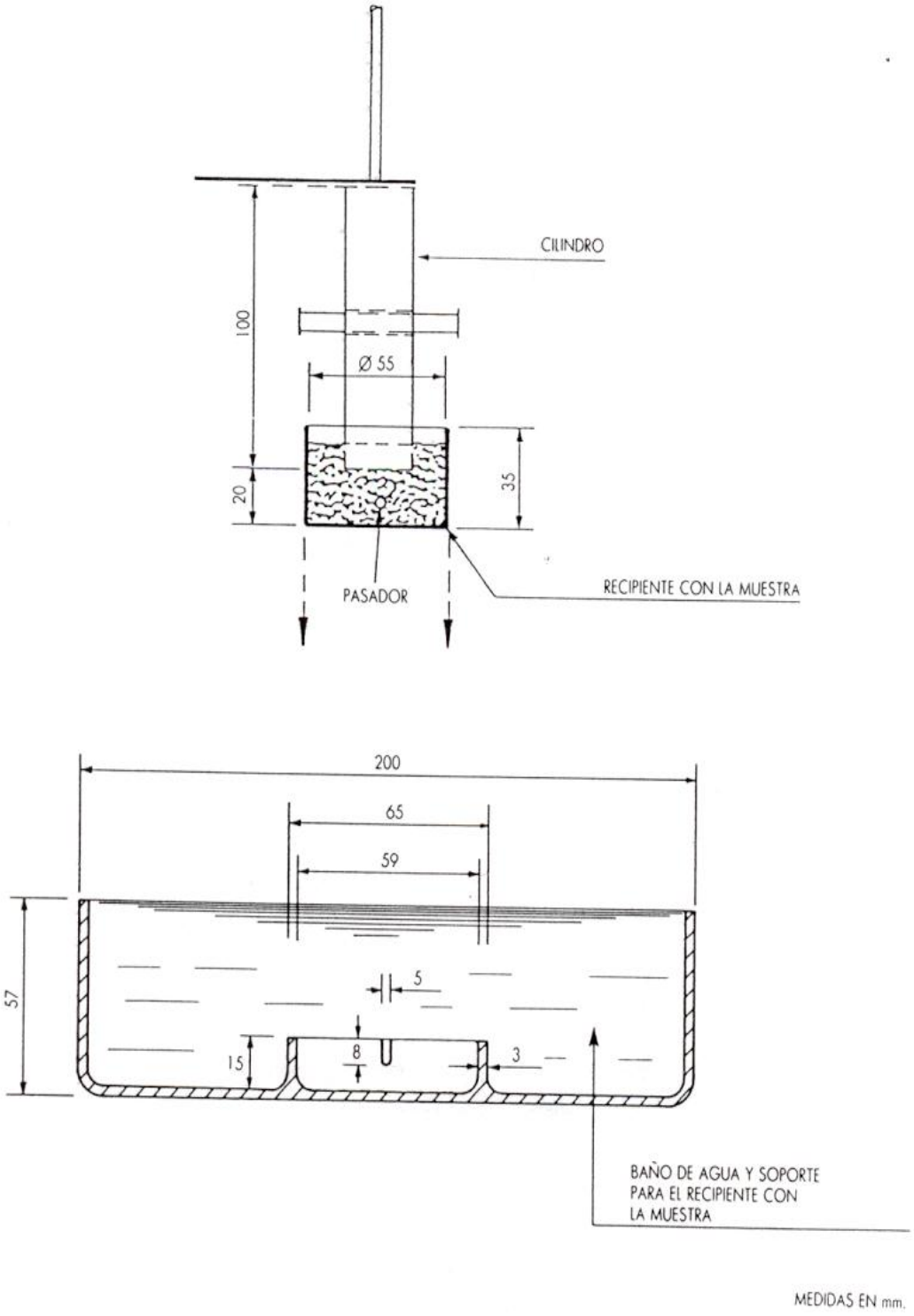


Figura 13. Esquema del depósito para el ensayo de recuperación elástica. Fuente: (SCT, México, 2000)

3.8 Recuperación Elástica por Ductilómetro (ASTM D6084, SCT M-MMP-4-05-026-02)

3.8.1 Contenido

Se describe el procedimiento de prueba para determinar la recuperación elástica de los materiales asfálticos.

3.8.2 Objetivo

Esta prueba permite determinar la recuperación elástica de los materiales asfálticos a través del uso del ductilómetro y una muestra.

Los especímenes se sacan aparte a razón de 5 cm/min y se mantienen después de una elongación específica. Los especímenes se colocan al centro, permitiéndoles la recuperación sin moverlos durante una hora.

Esta prueba envuelve la utilización de materiales, operaciones y equipos peligrosos.

3.8.3 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:

Moldes

Los moldes deberán ser similares en el diseño al que se muestra en la Figura 14. El equipo deberá estar fabricado de bronce. Las dimensiones del molde serán las mostradas con sus variaciones permitidas indicadas.

Placa base

La placa base deberá ser hecha de material no absorbente y de un espesor suficiente para prevenir la deformación y de un tamaño suficiente para mantener de uno a tres moldes. La placa deberá ser uniformemente plana para asegurar que la superficie del fondo de cada molde sea tocado a todo lo largo.

Baño de agua

El baño de agua deberá mantenerse a la temperatura de prueba especificada con una variación de no más de ± 0.5 °C (± 1.0 °F) de ésta temperatura. El volumen del agua no deberá ser menor de 10 L. La profundidad del agua no debe ser menor de 50 mm, tal que el molde pueda estar inmerso a una profundidad de 25 mm. El agua en el baño, deberá estar libre de aceite, limo u otro material orgánico.

Termómetro

Para pruebas a 25°C (77°F) usar termómetro para prueba de la Viscosidad Saybolt, para medir la temperatura del baño de agua y la temperatura en la máquina de prueba. Para pruebas de otras temperaturas, utilizar el termómetro ASTM de un apropiado rango y precisión. Ya que los resultados de las pruebas son dependientes de las condiciones exactas de la medida de la temperatura, los termómetros deberán estar calibrados por el método de verificación y calibración por medio de líquido dentro de vidrio en termómetros (ASTM 77).

Máquina de prueba

Para sacar la prueba de material bituminoso, puede utilizarse cualquier aparato que esté construido de tal forma que le permita al espécimen estar continuamente inmerso en agua, mientras que las 2 agarraderas son retiradas a velocidad uniforme y sin vibración.

Calentador

Para derretir el material bituminoso, se puede utilizar un horno o placa caliente, calentado por electricidad o gas.

Contenedor

Cualquier contenedor apropiado, puede ser utilizado para mantener el material bituminoso mientras es derretido.

Cortador

Cualquier implemento conveniente, tal como un cuchillo o espátula, podrá ser utilizado, cuidando que el filo sea derecho y al menos tenga 38 mm de largo (1 ½ in).

3.8.4 Procedimiento

Preparación del equipo

Coloque el molde en la placa base para prevenir que el material de prueba se pegue, recubra la superficie de la placa y las superficies interiores de los lados apropiadamente (Nota).

Nota: Mezcla de glicerina y dextrina o talco (3 g de glicerina por 5 g de dextrina o talco han sido usados satisfactoriamente), silicón, grasa, o aceite de castor (100:1)

En peso calentado de 204 a 232 °C (400 a 450 °F) y mezclada hasta que sea homogénea, han sido apropiados.

Si el residuo de la emulsión del polímero modificado está siendo probado, el material bituminoso que deberá probarse deberá ser el residuo obtenido por medio de la evaporación de la emulsión de prueba a 162.8 $\pm$ 2.5 °C (325 $\pm$ 5 °F), y no por medio de la destilación.

Moldeando los especímenes

Caliente la muestra con cuidado, impidiendo sobrecalentamiento local, hasta que esté suficientemente fluido, para que se pueda escurrir. Después escurra el material bituminoso en el molde, teniendo cuidado de no producir alguna burbuja de aire. Mueva el material suavemente hacia un lado y hacia otro hasta que el molde se llene a más de su nivel. Al llenar el molde, tenga cuidado de no derramar la muestra. Deje el molde y su contenido a temperatura ambiente durante 30 o 40 minutos, después coloque la placa base y el molde lleno en el baño de agua a la temperatura especificada de prueba durante 30 minutos. Remueva la placa base y el molde lleno del baño de agua, y con un cortador caliente quite el exceso de material bituminoso para que el molde quede a su nivel lleno raso. Tenga cuidado durante la operación de cortado, que el material no se salga de la placa base, ni de los lados del molde.

Manteniendo el espécimen a temperatura estándar

Coloque la placa base y el molde lleno en el baño de agua o la máquina de prueba y manteniendo la temperatura específica en un periodo de 85 a 95 minutos. La prueba deberá ser llevada a cabo en la temperatura especificada. Remueva la muestra de la placa, separe las piezas laterales e inmediatamente pruebe la muestra.

Prueba

Al empezar la prueba, el agua en el tanque de la máquina de prueba deberá cubrir el espécimen arriba y abajo, y deberá ser de por lo menos 25 mm. Coja las agarraderas o los ganchos del adaptador de fuerza y de la máquina de prueba y hale las agarraderas separándolas a 5 cm/min $\pm$ 5.0 %, hasta que la muestra haya sido alongada 20 cm. Prepare el ductilómetro y mantenga la muestra en su posición alongada durante 5 minutos. Después de los 5 minutos divida el espécimen en su centro con un par de tijeras y permita que el centro del espécimen permanezca en el ductilómetro sin moverlo durante una hora. Al final de la hora, libere el ductilómetro del mecanismo y retire la mitad de la muestra hasta que los extremos de la muestra derretida, apenas se toquen. Lea el apuntador del ductilómetro y registre el valor.

3.8.5 Cálculos y resultados

Calcule el porcentaje de recuperación de elongación en número cerrado (sin decimales). El porcentaje de recuperación de elongación está dado por la siguiente ecuación:

$$\%\ \text{Recuperación de elongación} = \left(\frac{20 - x}{20}\right) x\ 100 \qquad \textbf{Ec.}\ (4)$$

Donde:

x = Lectura final en cm, después de volver a juntar las 2 partes separadas.

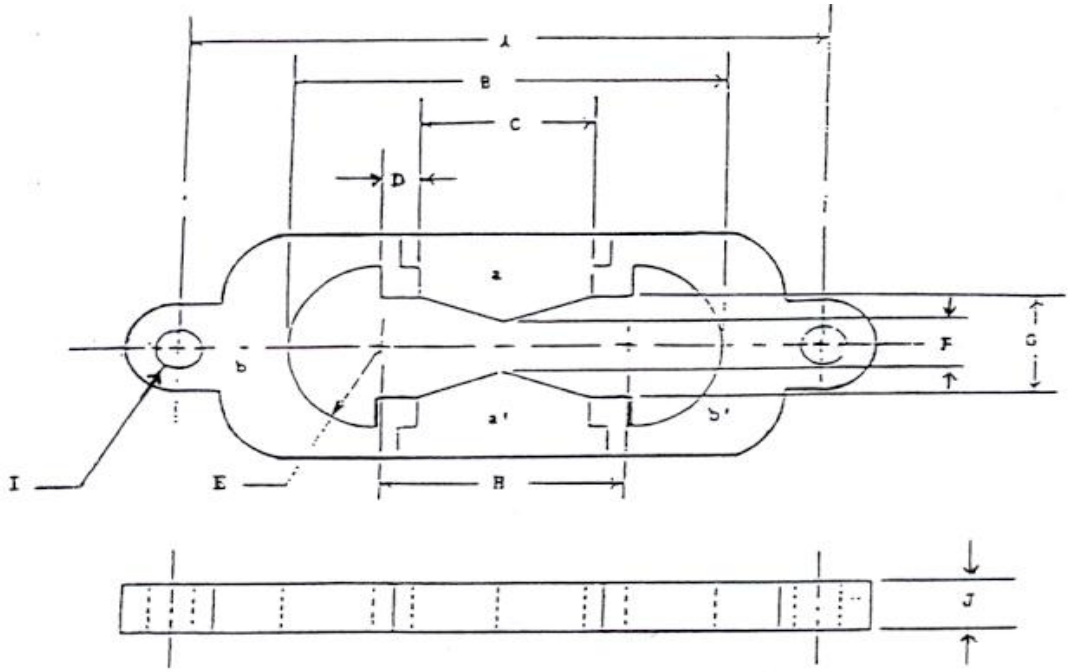


Figura 14. Molde para la prueba de recuperación elástica del espécimen. Fuente: (SCT, México, 2000)

A = Distancia entre centros

B = Longitud total de la muestra

C = Distancia entre agarraderas

D = Hombro

E = Radio

F = Ancho de la sección transversal mínima

G = Ancho de la boca de la agarradera

H = Distancia entre centros de radio.

I = Diámetro del agujero

J = Espesor

Capítulo 4

Método Universal de Caracterización de Ligantes®

Capítulo 4. Método Universal de Caracterización de Ligantes®

En este capitulo se presenta el Método Universal de Caracterización de Ligantes mejor conocido como Método UCL®, herramienta básica para el desarrollo experimental de esta monografía.

4.1 Origen

El Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL®), fue desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, España, por los Dres. Félix Pérez Jiménez y Rodrigo Miró Recasens, en el año 1995.

4.2 Características

Este nuevo método de laboratorio tiene como objetivo caracterizar los cementos asfálticos que se usan en la fabricación de mezclas asfálticas sobre los pavimentos de carreteras. Es un proceso de evaluación más que de diseño y se basa en las propiedades mecánicas que el ligante proporciona a la mezcla, analizando, comparando y diferenciando al mismo tiempo el comportamiento de betunes convencionales y modificados, de ahí su definición de universal, por el hecho de poder ser aplicable a cualquier betún.

El Método UCL evalúa las propiedades funcionales del ligante a partir de la determinación del grado de cohesión que proporciona a una mezcla patrón y de la observación de cómo esta cualidad varía con la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento. Se define como una tecnología de fácil ejecución caracterizándose sobre todo por su sencillez y la fácil interpretación y valoración de sus resultados, la cual ofrece una novedosa herramienta para clasificar y cotejar los distintos betunes que podrían utilizarse en una determinada obra de pavimentación.

La cohesión proporcionada por el ligante a la mezcla es considerada tan básica y fundamental, pero no ha sido tomada en cuenta hasta ahora en la caracterización de los materiales bituminosos. Esto puede ser debido a la falta de ensayos que permitan evaluar esta característica del ligante. Recientemente, se está empezando a medir esta propiedad a través de ensayos de tracción

directa o mediante rotura a cortante y por impacto (péndulo), aunque es el Método UCL el que más ventajas puede ofrecer, dada su simplicidad y el poder evaluar el poder aglomerante del ligante sobre una mezcla patrón, tras el proceso de envuelta y adherencia a los áridos, y no la cohesión del producto en masa que puede ser muy diferente.

Para determinar la cohesión del ligante este método consiste en fabricar una mezcla patrón, compuesta por 1000 g de áridos, 80% del tamaño 2.36/4.75 mm y 20% del tamaño 0.60/2.36 mm (tamices ASTM) y 45 g de ligante a caracterizar, y elaborar con ella una probeta Marshall, según la norma española NLT-352/*86* ***"Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por el ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste"***, para después ser ensayada en la máquina de desgaste de Los Ángeles sin carga abrasiva descrita en la norma NLT-149/72.

Durante el ensayo se van desprendiendo por impacto y abrasión los áridos más superficiales de la probeta, determinándose, tras cumplirse 300 revoluciones, su pérdida de peso en %, referido al peso inicial, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Pc = \frac{Pi - Pf}{Pi} * 100} \qquad \textbf{Ec.} (5)$$

Dónde:

Pc = Pérdidas al cántabro, en (%)

Pi = Peso inicial, en g

Pf = Peso final, en g

El método valora el comportamiento de los cementos asfálticos como parte integrante de la mezcla asfáltica, mediante la evaluación de sus propiedades fundamentales a través del ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste.

El desarrollo de esta metodología se hizo pensando en la caracterización de los ligantes desde el punto de vista de su utilización en carreteras. No se ha tenido en cuenta su consistencia, su composición, su viscosidad, sino aquellas características que están relacionadas con las propiedades que debe proporcionar el ligante a la mezcla para su adecuado comportamiento en el

firme. Estas propiedades funcionales que los ligantes deben aportar al comportamiento de las mezclas bituminosas son las siguientes:

Cohesión

Se define como el poder aglomerante que proporciona a la mezcla. Es la capacidad de conservar la unión entre los agregados pétreos. La misión del cemento asfáltico es aglomerar los distintos elementos del árido, proporcionando cohesión a la mezcla. Esta propiedad fundamental del ligante no es valorada, en general, por los ensayos convencionales de caracterización de ligantes.

Susceptibilidad térmica

El comportamiento mecánico de los cementos asfálticos varía con la temperatura y el tiempo de aplicación de carga. A temperaturas altas, o tiempos largos de aplicación de carga, el ligante puede fluir, es inconsistente, y la mezcla se deforma. A temperaturas bajas, o tiempos cortos de aplicaciones de carga, el ligante se fragiliza y la mezcla pierde tenacidad.

En la Figura 15 se puede ver el comportamiento que presentan los cementos asfálticos, siendo frágil a bajas temperaturas, presentando un comportamiento elasto-plástico a temperaturas intermedias e inconsistente a altas temperaturas.

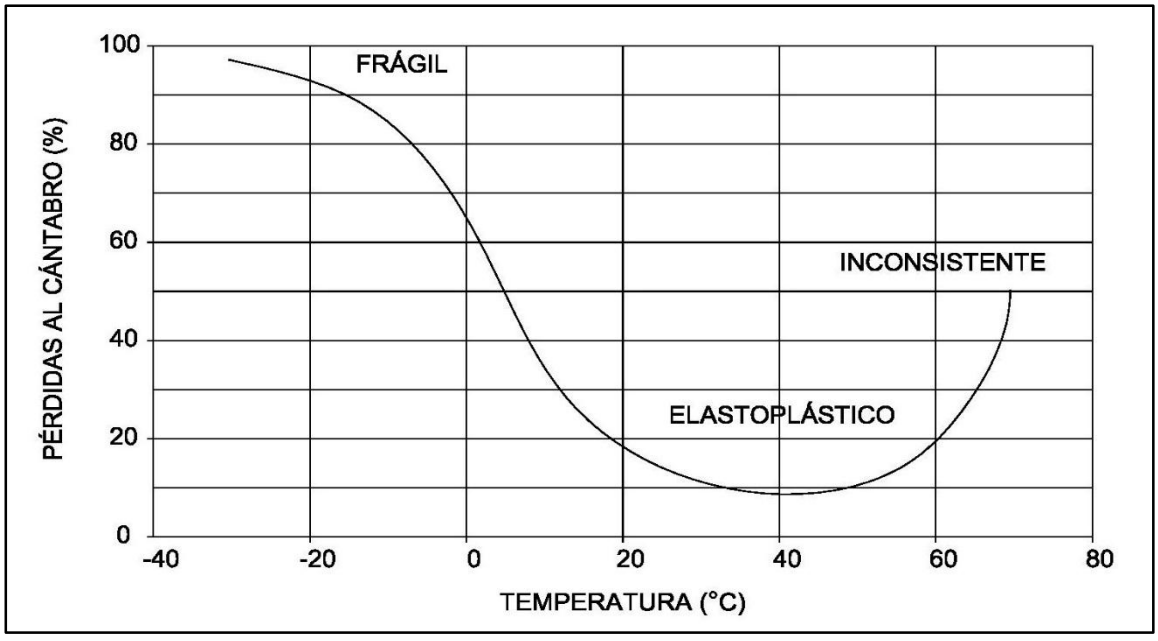


Figura 15. Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes bituminosos (Curva de estado). Fuente: (Miró Recasens, 1994)

Adhesividad

El cemento asfáltico debe ser capaz de envolver a los áridos, dando cohesión a la mezcla y resistir la acción de desenvuelta del agua. Por efecto del agua, el ligante se separa del árido y disminuye así la cohesión de la mezcla.

La acción del agua produce un efecto de desenvuelta, siendo muy importante conocer la adhesión del ligante al árido en presencia de agua (adhesividad).

Mediante el ensayo de pérdidas por desgaste que utiliza el Método UCL se puede valorar la adhesividad árido-ligante, determinando las pérdidas de la mezcla cuando ésta se ensaya en seco o tras permanecer cierto tiempo sumergida en agua. El incremento de las pérdidas (Figura 16) está directamente relacionado con la mejor o peor adhesividad del ligante al árido.

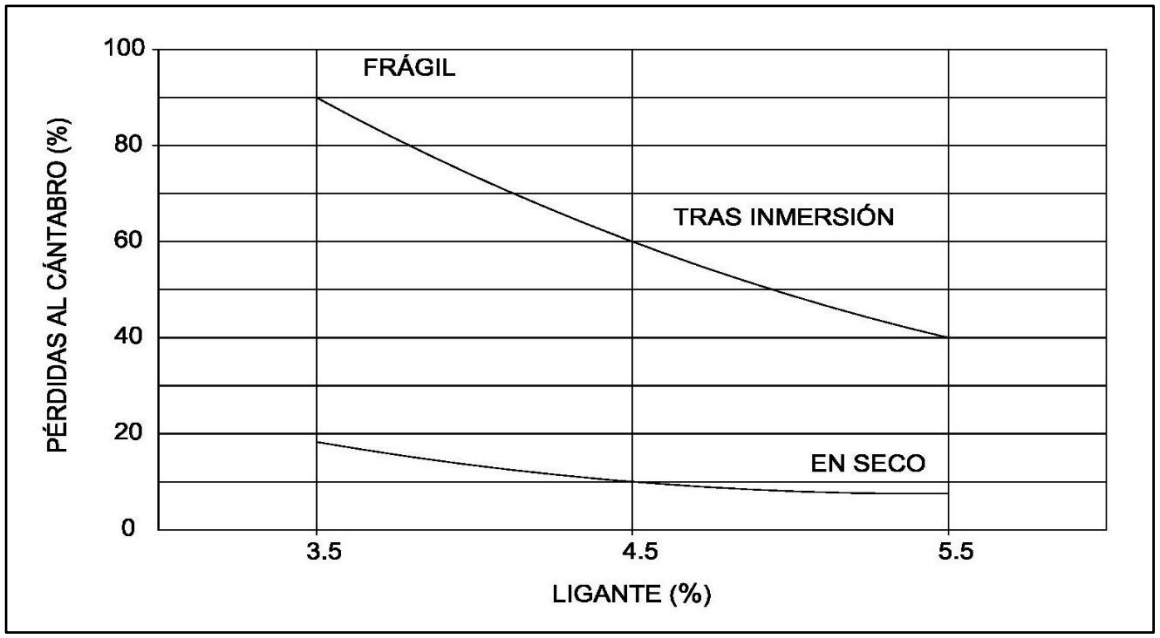


Figura 16. Evaluación de la adhesividad árido-ligante. Pérdidas al Cántabro en seco y tras inmersión. Fuente: (Miró Recasens, 1994)

Envejecimiento

La resistencia al envejecimiento de los ligantes bituminosos por la acción de los agentes atmosféricos (aire, calor, agua, etc.) y de los rayos ultravioletas es una propiedad de los ligantes relacionada muy directamente con su durabilidad. Cuanto más rápida sea esta oxidación y envejecimiento, mayor será la rapidez

con la que el ligante se volverá frágil, disminuyendo su resistencia a la acción abrasiva del tráfico.

El envejecimiento de las mezclas bituminosas es uno de los factores que más inciden en el acortamiento de la vida útil de los pavimentos. Sus consecuencias incluyen tanto la disminución de las condiciones de confort y seguridad como el perjuicio económico que significa realizar tareas frecuentes de mantenimiento y rehabilitación. [14]

Este efecto de envejecimiento se puede simular y acelerar en el laboratorio y mediante el ensayo de pérdidas evaluar como dicho proceso va afectando a las características del ligante. Se obtiene así una curva pérdidas al Cántabro-tiempo de envejecimiento, claramente relacionada con el endurecimiento del ligante. Ver Figura 17.

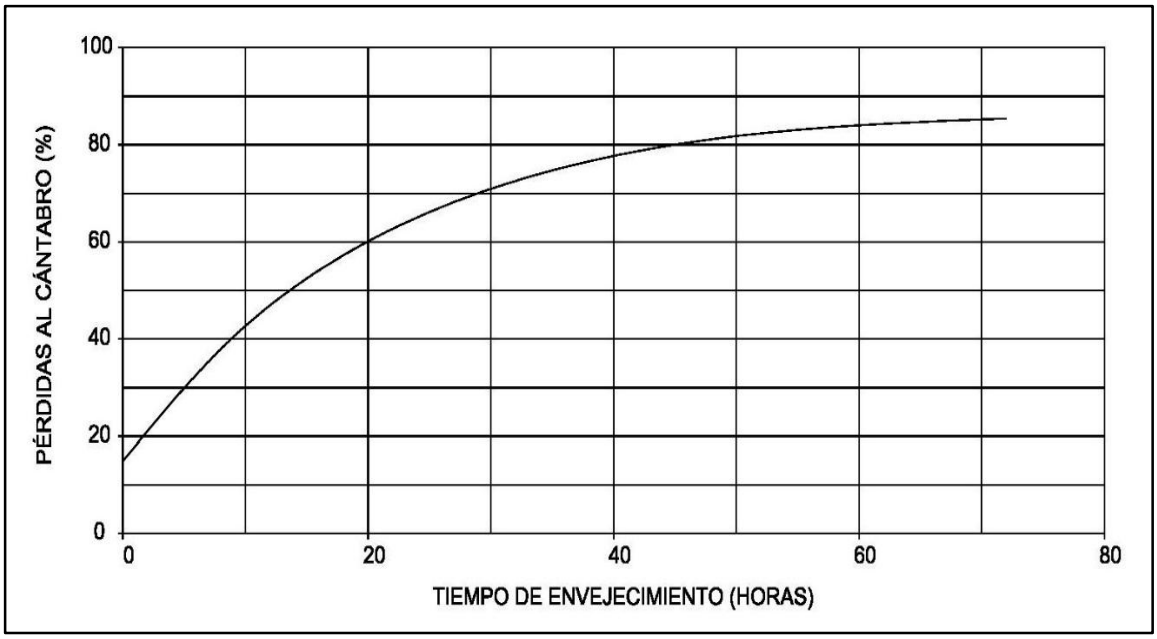


Figura 17. Curva de envejecimiento. Fuente: (Miró Recasens, 1994)

Las propiedades mencionadas anteriormente son tan fundamentales a la hora de evaluar la calidad de un ligante bituminoso, es por ello que para su estudio los investigadores en la materia desarrollaron este nuevo procedimiento.

4.3 Aplicación

Este método ha sido motivo de muchas tesis de grado doctorales y herramienta esencial en el desarrollo de escritos técnicos.

En el siguiente acápite se brindan detalles de un proyecto de investigación realizado por el Dr. Carlos Fonseca Rodríguez aplicando el Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL), el cual se titula: ***"Aplicación de Cal Viva y Cal Hidratada en la Construcción de Capas de Pavimentos Flexibles: Evaluación de Mejoras en las Propiedades Mecánica de los Materiales".***

Por motivos de interés solo se abordará el segmento del escrito que describe la aplicación del procedimiento UCL en los cementos asfálticos y la incorporación de cal hidratada a estos mismos.

4.3.1 Breve descripción del proyecto de investigación

El proyecto consistió en estudiar el desempeño o comportamiento de un cemento asfáltico convencional y de un cemento asfáltico modificado, con y sin cal, a diferentes temperaturas (susceptibilidad térmica), después de la acción del agua (adhesividad pasiva entre el agregado pétreo y cemento asfáltico) y después de un proceso de envejecimiento (oxidación de la película delgada). [9]

Para evaluar la influencia de la cal hidratada en las mezclas asfálticas, se procedió a realizar una serie de ensayos para así determinar los cambios de las propiedades mecánicas y reológicas de diferentes cementos asfálticos y mezclas asfálticas.

4.3.1.1 Cementos asfálticos evaluados

Se evaluaron 2 tipos cementos asfálticos, los cuales fueron a su vez modificados adicionándoles una determinada cantidad de cal hidratada, quedando en estudio los siguientes cementos asfálticos:

AC-20 : Cemento asfáltico AC-20 convencional.

AC-20 con cal : Cemento asfáltico AC-20 convencional más 2.4% de cal en peso.

MOD-SBS : Cemento asfáltico modificado con SBS.

MOD-SBS con cal: Cemento asfáltico modificado más 2.4% de cal en peso.

Nota: Los valores de la caracterización convencional de este proyecto se pueden observar en Anexo A.

4.3.1.2 Evaluación de la cohesión

Para evaluar la cohesión de estos 4 cementos asfálticos se empleó el Método UCL, con el cual mediante el concepto de pérdidas al Cántabro evalúa la resistencia a la disgregación de la mezcla asfáltica, antes los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico.

Como primer resultado el Método UCL muestra el comportamiento de los 4 cementos asfálticos evaluados. En la Figura 18 se muestran las pérdidas al Cántabro, en porcentajes, a diferentes condiciones de temperatura: -20, 0, 25, 40 y 60 °C. Tanto a bajas como a altas temperatura se puede observar que el cemento asfáltico modificado (MOD-SBS) presenta un mejor comportamiento que el cemento asfáltico convencional (AC-20), las pérdidas son menores. Sin embargo, cuando a estos dos cementos asfálticos se les adiciona cal hidratada, es claro ver que su comportamiento es aún mejor que cuando no se emplea cal hidratada, reduciéndose las pérdidas significativamente.

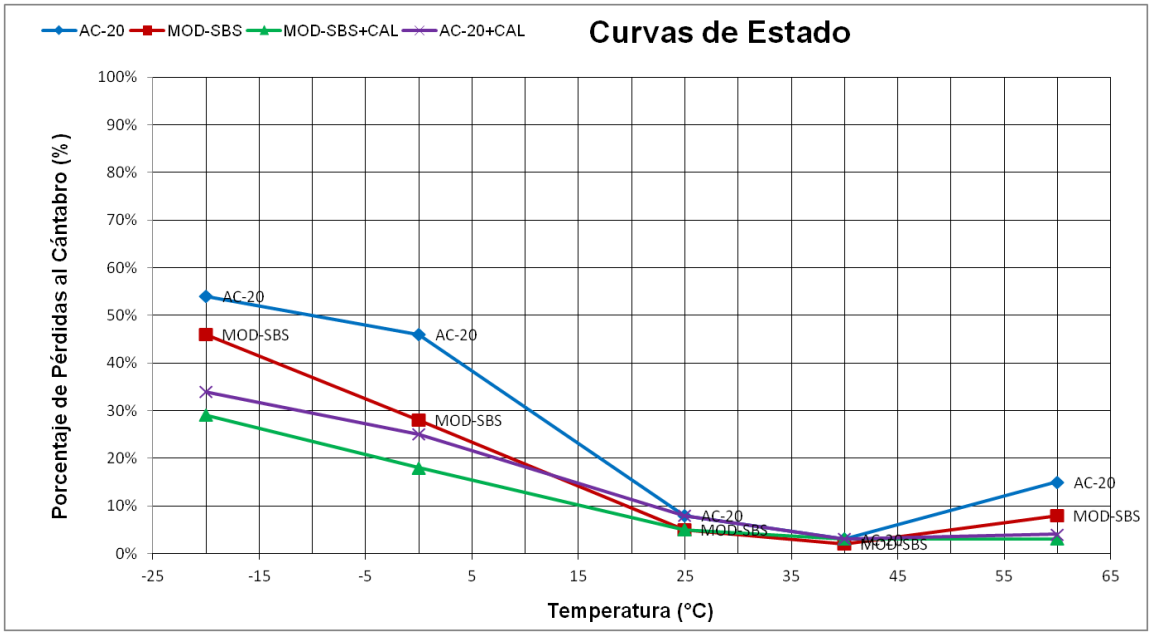


Figura 18. Curva de estado de los C.A ensayados. Fuente: (Fonseca Rodríguez, 2006)

Lo anterior pone en evidencia que al emplearse cal hidratada en una mezcla asfáltica, ésta tendrá un mejor comportamiento a bajas temperatura, lo cual se traducirá a una disminución de la fragilidad de la mezcla asfáltica, siendo por lo tanto menos susceptible a agrietamientos por contracciones a bajas temperaturas.

Por otro lado, a altas temperaturas, al ser menores las pérdidas como se observa en la Figura anterior, la presencia de cal hidratada en mezclas asfálticas elevará su resistencia a las deformaciones plásticas permanentes, retardando la aparición de roderas con el paso de cargas canalizadas, lentas y en zonas de altas temperaturas.

En la zona de temperaturas intermedias, entre 20 y 45 °C, el comportamiento de los 4 cementos asfálticos es similar, no presentan diferencias significativas. La mejora sustancial que la presencia de cal hidratada ofrece es en zonas donde las temperaturas son extremas, que es donde casualmente se presentan un deterioro más acusado de las mezclas asfálticas.

Como es conocido, la presencia de agua en las mezclas asfálticas construidas ocasiona que exista una pérdida de adhesividad pasiva entre el material pétreo y el cemento asfáltico, teniéndose como resultado la pérdida de cohesión de la mezcla y por consiguiente un deterioro acelerado de los pavimentos flexibles. En esta parte del ensayo, 3 probetas son sometidas en un baño a la presencia de agua a 60 °C durante 24 horas consecutivas. Después de esta etapa y adquiriendo la temperatura de ensayo de 25 °C, se evalúan las pérdidas al Cántabro y se comparan con el promedio de otras tres probetas en seco. Las diferencias de pérdidas entre la condición seca y húmeda son significativas y pueden observarse para cada cemento asfáltico en la Figura 19.

Sin embargo, si se observa a cada cemento asfáltico y lo comparamos entre ellos, se puede concluir que la presencia de un modificador del cemento asfáltico tipo polímero SBS contribuye a que estas pérdidas se disminuyan considerablemente, de un 77% en el caso de un AC-20 convencional a un 22% en un cemento asfáltico modificado con SBS.

Ahora, si al cemento asfáltico convencional, AC-20, se le adiciona cal hidratada, las pérdidas por presencia de agua se reducen de un 77% a un 30%, más aún, si al cemento asfáltico modificado se le adiciona cal hidratada, éste sufre una reducción del 22% al 16%.Esto significa que la presencia de cal hidratada incrementa considerablemente la cohesión que el cemento asfáltico proporciona a la mezcla asfáltica en presencia de agua. Esto se traduce en una reducción significativa de la presencia de baches en zonas lluviosas o épocas de lluvia.

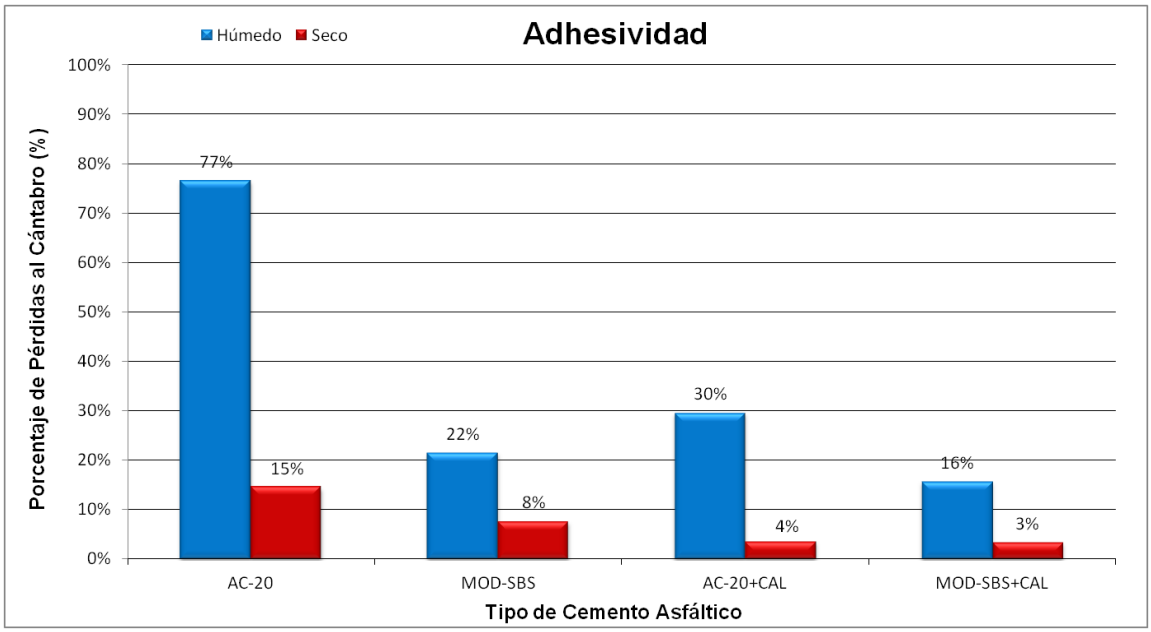


Figura 19. Adhesividad de los C.A ensayados. Fuente: (Fonseca Rodríguez, 2006)

Como tercera etapa del Método UCL, se evalúan las pérdidas al Cántabro después de haber sometido las probetas a diferentes períodos de envejecimiento de la película delgada de cemento asfáltico en el agregado pétreo. El proceso de envejecimiento rigidiza al cemento asfáltico haciéndole perder la flexibilidad del mismo y su capacidad de deformarse sin llegar a romperse.

En la Figura 20 se puede observar como el someter la probeta durante 4 y 8 horas a una temperatura de 165 °C con aire forzado, hace perder su cohesión elevándose las pérdidas. Esto es más acusado en el cemento asfáltico convencional AC-20 y en el modificado MOD-SBS. Al adicionar cal hidratada a ambos cementos asfálticos las pérdidas disminuyen considerablemente.

Esto tendrá como consecuencia una mayor durabilidad de la mezcla asfáltica frente a los procesos de envejecimiento que fenómenos naturales como el aire, el agua y el sol provocan en estos materiales empleados en pavimentos flexibles.

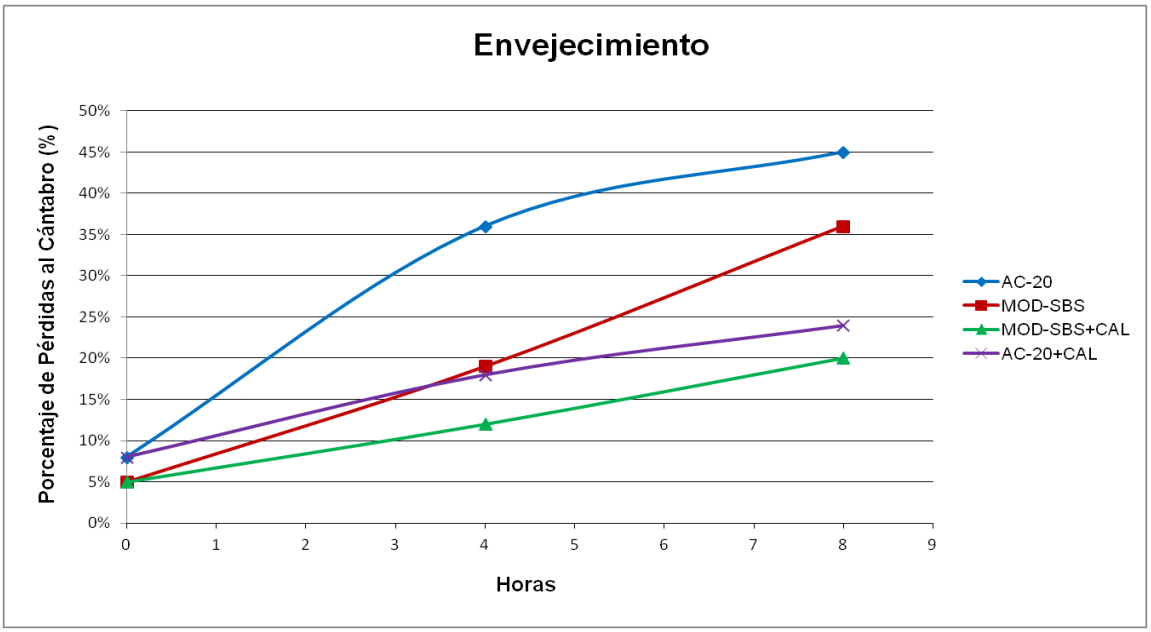


Figura 20. Curva de envejecimiento de los C.A ensayados. Fuente: (Fonseca Rodríguez, 2006)

Con este estudio experimental el Dr. Fonseca llegó a las siguientes conclusiones:

El empleo de cal hidratada en las mezclas asfálticas trae muchos beneficios, como es una mayor durabilidad de la misma en los pavimentos flexibles o como capa de rodadura sobre pavimentos rígidos. Esta mayor durabilidad de la mezcla asfáltica se debe a la mejora de sus propiedades mecánicas y reológicas entre las que podemos mencionar:

- Menor susceptibilidad térmica, o sea presenta menores cambios de sus propiedades con respecto a los cambios que se tienen de temperaturas, evitándose agrietamientos por contracciones térmicas a bajas temperaturas y deformaciones plásticas a altas temperaturas.
- Más resistente a la acción de desenvuelta del agua, evitándose la aparición de baches.
- Mayor resistencia a los procesos de envejecimiento. Conservando más tiempo una buena elasticidad y flexibilidad.

Capítulo 5

Ensayos

Capítulo 5. Ensayos

En este capítulo se planteará el desarrollo de los ensayos en todas sus fases. También se presentarán las características de los cementos asfálticos, se detallará el tipo de agregado utilizado y se describirán los resultados obtenidos haciéndose un análisis de los mismos.

5.1 Materiales

5.1.1 Áridos

Los agregados que se emplearon en la confección de las probetas fueron de tipo Basalto, debido a que este es el material pétreo utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas en nuestro país.

5.1.2 Cal hidratada

A través de una serie de ensayos se evaluó la influencia que la cal hidratada produce en la mezcla asfáltica, con el objetivo de observar el comportamiento del cemento asfáltico con cal.

5.1.3 Cementos asfálticos

Mediante los métodos convencionales designados por las normas ASTM se caracterizaron 3 tipos de cementos asfálticos: un convencional AC-20, un AC-20 modificado con polímero SBS al 2.5%, ambos de México y un convencional AC-30 de Nicaragua (Ver Tablas en Anexo B).

Cabe destacar que el cemento asfáltico AC-30 de Nicaragua, se evaluó en dos partes, primero se analizó una lata y posteriormente una segunda lata de este, debido que para su evaluación tuvo que ser llevado hasta el laboratorio de asfaltos del Instituto Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey.

Para abreviar su escritura en el proceso, se indicarán de la siguiente forma:

- Cemento asfáltico convencional AC-20: **AC-20**
- Cemento asfáltico convencional AC-20 modificado con polímero SBS al 2.5%: **AC-20 Mod-SBS**
- Cemento asfáltico convencional AC-30: **AC-30**

5.2 Diseño Experimental

En este estudio se utilizó el Método UCL para evaluar el comportamiento de tres cementos asfálticos al ser expuestos a distintas condiciones y así mismo también evaluar la adición de la cal hidratada en uno de ellos (AC-20).

A continuación se presentará una lista de los equipos empleados y se describirá el plan de trabajo que se siguió para realizar el estudio experimental:

5.2.1 Equipos de laboratorio

- Tamices
- Agitador de tamices
- Charolas
- Balanzas
- Sartén
- Estufa
- Termómetro
- Cucharas
- Estopa
- Guantes
- Moldes de compactación Marshall
- Espátulas
- Embudo metálico
- Papel de filtro
- Compactador Marshall
- Extractor de probetas
- Tizas
- Vernier
- Tina de curado
- Hornos
- Congeladores
- Incubadora
- Máquina de los Ángeles

5.2.2 Separación de partículas de los áridos

El material pétreo pasó por un proceso de cribado, donde fue colocado en un agitador (Foto 1), utilizando los tamices No. 4, No. 8 y No. 30 (Tabla 8), siendo ubicados de manera descendente en el orden antes mencionado. Se definió como agregado grueso el material retenido en el tamiz No. 8 y se llamó material fino el retenido en el tamiz No. 30. En la Foto 2 se muestra el momento cuando el material estaba siendo cribado.



Foto 1. Agitador de Tamices.

Tabla 5. Tamices estándares ASTM. Fuente: (Tabla ASTM E - 11/95)

Tamiz	
ASTM	**Mm**
No. 4	4.75
No. 8	2.36
No. 30	0.60



Foto 2. Cribado del material pétreo.

5.2.3 Peso de los áridos

En la balanza se registró un peso de 800 g del agregado grueso (80%) y 200 g del agregado fino (20%), siendo depositados en charolas y teniendo un peso total de 1000 g.

5.2.4 Secado de los áridos

Se prosiguió a colocar las charolas en un horno a una temperatura de 120 °C para eliminar la humedad que el material pétreo podía contener. Este se deja aproximadamente un día pero el material que esta vez se utilizó no estaba muy húmedo y por esta razón solo fue necesario dejarlo 1 hora.

5.2.5 Calentamiento del C.A

La muestra de asfalto contenida en una lata fue colocada en el horno por un tiempo de 2 horas, para que el asfalto adquiriera el estado líquido y así facilitar la incorporación de este con el material pétreo al momento de realizar la mezcla asfáltica. Ver Foto 3.



Foto 3. Lata de cemento asfáltico colocada en el horno.

5.2.6 Confección de probetas

El procedimiento experimental (Método UCL), como se ha indicado anteriormente, consiste en fabricar una mezcla patrón compuesta por 1000 g de áridos y con un contenido de betún del 4.5% sobre los áridos, con la cual se confeccionan probetas Marshall.

En este estudio se fabricó una serie de 27 probetas para cada tipo de cemento asfáltico.

5.2.6.1 Probetas de AC-20

Una vez que se tenían los áridos libres de humedad, se procedió a colocarlos en un sartén que estaba puesto en una estufa y se mezclaron con el betún (4.5%). Ver Fotos 4 y 5.

Cabe señalar que se debe mezclar bien para que el asfalto envuelva en su totalidad al material pétreo hasta tener la mezcla aproximadamente a una temperatura de 150 °C (Foto 6). Al mismo tiempo se debe calentar en un horno el molde de compactación Marshall (Figura 21), el cual está compuesto por: collarín, molde y la placa base.

Después se coloca el molde sobre la base de compactación y se monta el collarín, se introduce un papel de filtro y el siguiente paso fue verter la mezcla en

el molde distribuyendo uniformemente con una espátula por medio de 15 golpes efectuados en su periferia y 10 en su interior. Nuevamente se introdujo otro papel de filtro pero en su superficie, para después ser llevado al compactador Marshall (Figura 22), empleando una energía de compactación de 50 golpes por cara.

Por último se retiró el papel de filtro de las probetas y cuando estas adquirieron la temperatura ambiente fueron desmoldadas en un extractor (Fotos 7 y 8). Posteriormente se etiquetaron con letras y números para poder ser identificadas. En este caso las probetas de AC-20 fueron nombradas de la siguiente forma: A_1, A_2, A_3, A_4, A_n.....A_{27}.

En las Tablas 6, 7, 8 y 9 se registran los valores de algunos parámetros que se calcularon una vez que ya se tenían elaboradas las probetas: densidad aparente, densidad máxima y vacíos en la mezcla asfáltica.



Foto 4. Depositando los áridos en el sartén.



Foto 5. Mezclando los áridos con el betún.



Foto 6. Verificando con el termómetro que la mezcla tenga la temperatura requerida (150 °C).



Figura 21. Moldes de compactación Marshall.



Figura 22. Compactador Marshall.



Foto 7. Extractor de probetas



Foto 8. Momento en que se extrae una probeta

5.2.6.1.1 Ejemplo de diseño de una probeta de AC-20

Probeta A_1

Cálculo de la altura promedio

Con ayuda de un Vernier se midió la altura, haciendo una lectura en tres distintas partes de la probeta (Figura 23), para después calcular el promedio de las h en cada probeta de asfalto.

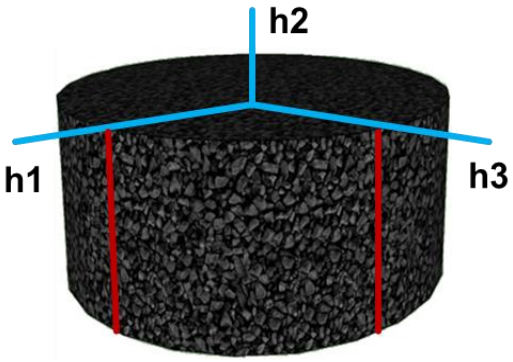


Figura 23. Alturas en las probetas. Fuente: (Fonseca Rodríguez, 2013)

$$\mathbf{Hprom} = \frac{\mathbf{h1 + h2 + h3}}{\mathbf{3}} \qquad \textbf{Ec.}\ (6)$$

$$Hprom = \frac{7.086\ cm + 7.068\ cm + 7.030\ cm}{3}$$

Hprom = 7.061 cm

Cálculo del Volumen

$$\mathbf{A} = \boldsymbol{\pi}\mathbf{r}^{\mathbf{2}} \qquad \textbf{Ec.}\ (7)$$

A = 3.14159 (10.16 / 2 cm)²

A = 81.073 cm²

$$\mathbf{Volumen} = \mathbf{Hprom} * \boldsymbol{\pi}\mathbf{r}^{\mathbf{2}} \qquad \textbf{Ec.}\ (8)$$

Vol = 7.061 cm ∗ 81.073 cm²

Vol = 572.483 cm³

Cálculo de la densidad aparente

$$\textbf{Densidad Aparente} = \frac{\textbf{Peso}}{\textbf{Volumen}} \qquad \textbf{Ec. (9)}$$

$$DA = \frac{1{,}021.2\ g}{572.483\ cm^3}$$

$DA = 1.784\ g/cm^3$

Vacíos en la mezcla asfáltica

Porcentaje de material pétreo y de cemento asfáltico:

Material Pétreo = 1,000 g

Cemento Asfáltico = 45 g (4.5 % en Peso)

Peso Total de la Probeta A_1 = 1,045 g

% de Material Pétreo = 100∗(1,000 g / 1,045 g) = 95.694 %

% de Cemento Asfáltico = 100∗(45 g / 1,045 g) = 4.306 %

Cálculo de densidad máxima de la probeta A_1

Para efectuar su cálculo se necesitan los siguientes valores:

Densidad del Basalto = 2.85 g/cm^3

Densidad del Cemento Asfáltico AC-20 = 1.028 g/cm^3

Con los datos anteriores se procede a realizar el cálculo de:

% Volumen de Material Pétreo = 95.694 / 2.85 g/cm^3 = 33.577 %

% Volumen Cemento Asfáltico = 4.306 / 1.028 g/cm^3 = 4.189 %

% Volumen Total = 33.577 + 4.189 = 37.766 %

Densidad Máxima = 100 / 37.766 = 2.648 g/cm^3

Cálculo de vacíos en la mezcla asfáltica

$$\textbf{Vacíos}\ (\%) = \frac{\textbf{Dmáx} - \textbf{DA}}{\textbf{Dmáx}} * \textbf{100} \qquad \text{Ec. (10)}$$

$$\text{Vacíos}\ (\%) = \frac{2.648\ g/cm^3 - 1.784\ g/cm^3}{2.648\ g/cm^3} * 100$$

Vacíos (%) = 32.63 %

Tabla 6. Registro de datos de las probetas de AC-20. Fuente: (Elaboración propia)

No Probeta	Peso Probeta (gr)	Alturas de Probetas			Altura Promedio (cm)	Volumen Probeta (cm3)	Densidad Aparente (g/cm3)	Densidad Máxima (g/cm3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)					
A1	1021,2	70,86	70,68	70,30	7,06	572,48	1,784	2,648	32,63
A2	1033,7	69,88	69,74	69,84	6,98	566,05	1,826	2,648	31,04
A3	1025,9	70,98	70,98	70,98	7,10	575,46	1,783	2,648	32,70
A4	1014,4	69,66	69,76	69,48	6,96	564,54	1,797	2,648	32,14
A5	1007,4	68,44	68,62	68,14	6,84	554,54	1,817	2,648	31,38
A6	1027,9	70,98	70,98	71,16	7,10	575,94	1,785	2,648	32,59
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Nota: Se puede observar la tabla completa en Anexo D.

5.2.6.2 Probetas de AC-20 Mod-SBS

La metodología de fabricación fue la misma y de igual manera se elaboraron 27 pobretas con la diferencia que el tipo de asfalto utilizado fue distinto, ya que en este caso se utilizó un AC-20 modificado con polímero SBS.

Estas probetas fueron etiquetadas de la siguiente forma: B_1, B_2, B_3, B_4.....B_{27}.

Tabla 7. Registro de datos de las probetas de AC-20 Mod-SBS. Fuente: (Elaboración propia)

No Probeta	Peso Probeta (g)	Alturas de Probetas			Altura Promedio (cm)	Volumen Probeta (cm3)	Densidad Aparente (g/cm3)	Densidad Máxima (g/cm3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)					
B1	1020,1	68,64	68,22	68,14	6,83	554,00	1,841	2,650	30,53
B2	1026,9	69,18	69,62	69,16	6,93	562.00	1,827	2,650	31,06
B3	1028,7	68,64	68,54	68,74	6,86	556,49	1,849	2,650	30,30
B4	1024,8	68,26	68,42	68,34	6,83	554,05	1,850	2,650	30,19
B5	1024,1	69,18	69,18	69,64	6,93	562,11	1,822	2,650	31,30
B6	1020,1	69,36	69,16	69,86	6,95	563,13	1,811	2,650	31,66
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Nota: Se puede observar la tabla completa en Anexo D.

5.2.6.3 Probetas de AC-20 adicionándole cal hidratada

En este caso se fabricaron 3 grupos, cada uno también integrado de 27 probetas y utilizando un AC-20, pero cabe señalar que a cada grupo se le adicionó distintas proporciones de cal hidratada.

En el primer grupo se pesó 800 g de agregado grueso, 195 g de fino y 5 g (0.5%) de cal hidratada y después se procedió a la elaboración de las 27 probetas. Estas fueron etiquetadas de la siguiente forma: C_1, C_2, C_3, C_4.....C_{27}.

En el segundo grupo se pesó 800 g de agregado grueso, 190 g de fino y 10 g (1%) de cal hidratada y de igual forma como las anteriores se procedió a la elaboración de las 27 probetas siendo etiquetadas de la siguiente forma: D_1, D_2, D_3, D_4.....D_{27}.

Y en el último grupo se pesó 800 gr de agregado grueso, 180 g de fino y 20 g (2%) de cal hidratada y se procedió a la elaboración de las ultimas 27 probetas, para después etiquetarlas de la siguiente manera: E_1, E_2, E_3, E_4.....E_{27}.

Tabla 8. Registro de datos de las probetas de AC-20 adicionándole 0.5% de cal. Fuente: (Elaboración propia)

No Probeta	Peso Probeta (g)	Alturas de Probetas			Altura Promedio (cm)	Volumen Probeta (cm3)	Densidad Aparente (g/cm3)	Densidad Máxima (g/cm3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)					
C1	1015,6	67,12	67,12	67,62	6,73	545,51	1,862	2,648	29,68
C2	1025,6	68,16	68,54	68,64	6,84	554,92	1,848	2,648	30,21
C3	1026,9	68,56	68,44	68,34	6,84	554,92	1,851	2,648	30,10
C4	1021,5	68,14	68,14	68,14	6,81	552,43	1,849	2,648	30,17
C5	1024,5	68,34	68,14	68,54	6,83	554,05	1,849	2,648	30,17
C6	1021,2	68,14	68,14	68,14	6,81	552,43	1,849	2,648	30,17
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Nota: Se puede observar la tabla completa en Anexo D.

5.2.6.4 Probetas de AC-30

El procedimiento de fabricación fue el mismo que los anteriores, teniendo como variante el tipo de cemento asfáltico y que se llevó a cabo en 2 partes, es decir se elaboraron 27 pobretas con un contenido de AC-30 en una lata y después con una segunda lata se elaboró la misma cantidad de probetas. Señalando que en la etapa donde fueron ensayadas se calculó el promedio de resultados entre las dos latas.

Estas probetas fueron etiquetadas de la siguiente forma:

Lata 1: F_1, F_2, F_3, F_4.....F_{27}.

Lata 2: G_1, G_2, G_3, G_4.....G_{27}.

Tabla 9. Registro de datos de las probetas de AC-30, Lata 1. Fuente: (Elaboración Propia)

No Probeta	Peso Probeta (g)	Alturas de Probetas			Altura Promedio (cm)	Volumen Probeta (cm3)	Densidad Aparente (g/cm3)	Densidad Máxima (g/cm3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)					
F1	1033,5	69,18	68,90	69,04	6,90	559,73	1,846	2,647	30,24
F2	1035,4	69,20	69,10	69,32	6,92	561,08	1,845	2,647	30,28
F3	1032,4	69,22	69,40	69,52	6,94	562,49	1,835	2,647	30,66
F4	1035,0	69,12	68,86	68,90	6,90	559,08	1,851	2,647	30,06
F5	1031,6	69,04	69,40	68,84	6,91	560,16	1,842	2,647	30,43
F6	1029,8	68,90	68,54	68,80	6,88	557,35	1,848	2,647	30,20
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Nota: Se puede observar la tabla completa en Anexo D.

Se fabricaron en total 189 probetas de cementos asfálticos, con algunas variaciones en cada caso. En la Foto 9 se pueden observar ejemplos de las probetas.



Foto 9. Serie de 27 probetas.

5.2.7 Ensayo de probetas (Determinación de pérdidas al Cántabro)

El Método UCL ensaya las probetas Marshall en la máquina de los Ángeles (Figura 24), para evaluar tres elementos importantes en el cemento asfáltico como lo son: su comportamiento cuando es sometido a diferentes temperaturas (Susceptibilidad térmica), el efecto que el agua produce en sus características principales (Adhesividad árido-ligante) y después de haber sido expuesto a un proceso de envejecimiento.

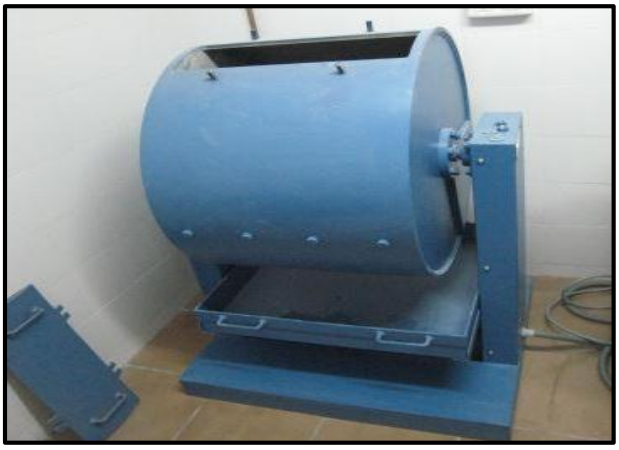


Figura 24. Máquina de Desgaste de los Ángeles.

5.2.7.1 Susceptibilidad térmica

Para estudiar la susceptibilidad térmica las probetas fueron colocadas en congeladores (Foto 10), incubadora (Foto 11) y hornos (Foto 12) para que estas adquirieran la temperatura de ensayo. Los resultados obtenidos para cada temperatura es el promedio de tres resultados o de tres probetas ensayadas bajo las mismas condiciones. Las temperaturas a las que se ensayaron las probetas fueron: -20, 0, 10, 25, 40 y 70 °C.

El primer paso fue registrar el peso inicial de cada probeta antes de ser sometida a las distintas condiciones de temperatura.

Cabe señalar que las probetas (A_{10}, A_{11}, A_{12}, B_{10}, B_{11}, B_{12}, C_{10}, C_{11}, C_{12}, D_{10}, D_{11}, D_{12}, E_{10}, E_{11}, E_{12}) ya se encontraban en la condición de 25 °C debido a que esa es la temperatura del laboratorio por lo cual se procedió a ensayarlas de inmediato.

Después en congeladores a las temperaturas de: -20 °C se introdujeron las probetas (A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3, D_1, D_2, D_3, E_1, E_2, E_3), luego a temperatura de 0 °C las probetas (A_4, A_5, A_6, B_4, B_5, B_6, C_4, C_5, C_6, D_4, D_5, D_6, E_4, E_5, E_6) y por último en una incubadora a temperatura de 10 °C las probetas (A_7, A_8, A_9, B_7, B_8, B_9, C_7, C_8, C_9, D_7, D_8, D_9, E_7, E_8, E_9). Todas por un periodo de tiempo de 4 horas.

En hornos se metieron las probetas (A_{13}, A_{14}, A_{15}, B_{13}, B_{14}, B_{15}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, D_{13}, D_{14}, D_{15}, E_3, E_{14}, E_{15}) a 40 °C y otro grupo de probetas (A_{16}, A_{17}, A_{18}, B_{16}, B_{17}, B_{18}, C_{16}, C_{17}, C_{18}, D_{16}, D_{17}, D_{18}, E_{16}, E_{17}, E_{18}) a 70 °C de igual forma que las anteriores se dejaron ahí 4 horas.

Una vez conseguida la temperatura necesaria inmediatamente se ensayaron en la máquina de los Ángeles, determinando la pérdida sufrida en la masa de la probeta y registrando así el peso final (Foto 13). La Tabla 10 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos de las probetas después de haber sido ensayadas, tomando como referencia el cemento asfáltico AC-20.

En el caso de las probetas de AC-30 fueron ensayadas a las temperaturas de -20, -10, 0, 25, 40 y 60 °C. Hubo variación en 2 temperaturas con respecto a las que se utilizaron con los cementos asfálticos anteriores, debido a que para la realización de los ensayos al AC-30, se presentaron ciertas limitaciones:

- El traslado de este material es muy costoso vía terrestre y prohibido de manera aérea.

- Se arriesgó a trasladar de manera encubierta 2 latas, lo que no fue suficiente para la realización de mayores ensayos (no se le realizó la incorporación de cal hidratada).

- Por factor tiempo y debido a la llegada tardía del cemento asfáltico, el ensayo fue realizado por el personal de laboratorio, trabajando dos temperaturas distintas, por razones desconocidas.



Foto 10. Probetas colocadas en congeladores.

.



Foto 11. Probetas colocadas en un horno.



Foto 12. Probetas colocadas en una incubadora.



Foto 13. Ejemplo del peso de una probeta ANTES (izquierda) y DESPUÉS (derecha) de ser ensayada en la máquina de los Ángeles.

Tabla 10. Resultados del Método UCL con AC-20. Distintas temperaturas (-20, 0, 10, 25, 40, 70) °C. Fuente: (Elaboración propia)

Temp. Probeta (°C)	Probeta No.	Peso de Probetas		Diferencia en Peso (g)	Desgaste (%)	Desgaste Promedio (%)
		Inicial (g)	Final (g)			
-20	A1	1021,50	110,60	910,90	89,17	96,39
	A2	1034,10	0,00	1034,10	100,00	
	A3	1026,50	0,00	1026,50	100,00	
0	A4	1014,90	277,20	737,70	72,69	74,88
	A5	1007,60	280,10	727,50	72,20	
	A6	1028,40	208,30	820,10	79,75	
10	A7	1024,00	587,80	436,20	42,60	46,66
	A8	1029,20	531,40	497,80	48,37	
	A9	1033,70	527,20	506,50	49,00	
25	A10	1021,90	826,00	195,90	19,17	17,90
	A11	1015,50	847,40	168,10	16,55	
	A12	1018,90	835,80	183,10	17,97	
40	A13	1022,30	894,90	127,40	12,46	11,33
	A14	1018,10	914,30	103,80	10,20	
	A15	1023,50	923,20	100,30	9,80	
70	A16	1005,60	138,80	866,80	86,20	85,61
	A17	1020,00	192,20	827,80	81,16	
	A18	1010,50	106,30	904,20	89,48	

Nota: Los resultados de los demás cementos asfalticos en estas condiciones se pueden observar en Anexo D.

5.2.7.2 Adhesividad árido-ligante ante la acción del agua

El procedimiento desarrollado se basa en determinar el incremento de las pérdidas al Cántabro tras un período de inmersión en agua de la probeta. El cual consistió en sumergir las probetas (A_{19}, A_{20}, A_{21}, B_{19}, B_{20}, B_{21}, C_{19}, C_{20}, C_{21}, D_{19}, D_{20}, D_{21}, E_{19}, E_{20}, E_{21}) en una tina de curado a 60 °C por 24 horas. Ver Foto 14.

Cumplido el tiempo se sacaron (Foto 15), se dejaron escurrir otras 24 horas y después se ensayaron en la máquina de los Ángeles, registrando su peso final una vez extraída de la misma, para así determinar el porcentaje de pérdidas al Cántabro que la probeta experimentó al haber sido sometida previamente a un período de inmersión en agua. En la Tabla 11 se muestra como ejemplo los resultados obtenidos del AC-20 en esta condición.



Foto 14. Probetas dentro de una tina de curado.



Foto 15. Momento en que se sacan las probetas de la tina de curado.

Tabla 11. Resultados del Método UCL con AC-20. Condición húmeda. Fuente: (Elaboración propia)

Temp. Probeta (°C)	Probeta No.	Peso de Probetas		Diferencia en Peso (g)	Desgaste (%)	Desgaste Promedio (%)
		Inicial (g)	Final (g)			
60→25	A19	1049,00	82,40	966,80	92,14	83,21
	A20	1059,30	225,80	833,50	78,68	
	A21	1056,40	223,70	832,70	78,82	

Nota: Los resultados de los demás cementos asfálticos en esta condición se pueden observar en Anexo D.

5.2.7.3 Proceso de envejecimiento

En esta parte las probetas fueron sometidas a un proceso de envejecimiento, estas se metieron en un horno a 163 °C y tuvieron que ser enmalladas a como se muestra en la Foto 16, para evitar su deformación, debido a la elevada temperatura.

Las probetas (A_{22}, A_{23}, A_{24}, B_{22}, B_{23}, B_{24}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, D_{22}, D_{23}, D_{24}, E_{22}, E_{23}, E_{24}) se colocaron en el horno por un tiempo de 4 horas y las probetas (A_{25}, A_{26}, A_{27}, B_{25}, B_{26}, B_{27}, C_{25}, C_{26}, C_{27}, D_{25}, D_{26}, D_{27}, E_{25}, E_{26}, E_{27}) a 8 horas. Cabe señalar que era necesario darles vuelta cada 2 horas para evitar el escurrimiento del betún, es decir, que debido a que la temperatura es muy alta este se vuelve líquido y volteándolas se evita su pérdida.

Cuando pasó el período respectivo para cada probeta, se sacaron y se les retiró la malla. Una vez que adquirieron la temperatura ambiente (no antes de 6 horas) se ensayaron en la máquina de los Ángeles y se calcularon las pérdidas. En la Tabla 12 se puede observar un ejemplo de los resultados del AC-20 cuando fue sometido a un proceso de envejecimiento.

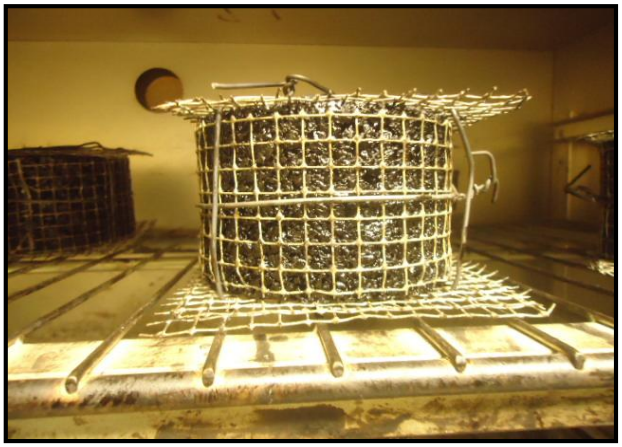


Foto 16. Simulación de los efectos de envejecimiento.

Tabla 12. Resultados del Método UCL con AC-20. Períodos de envejecimiento. Fuente: (Elaboración propia)

Temp. Probeta (°C)	Probeta No.	Peso de Probetas		Diferencia en Peso (g)	Desgaste (%)	Desgaste Promedio (%)
		Inicial (g)	Final (g)			
163(4h)	A22	1021,00	463,40	557,60	54,61	57,38
	A23	1019,60	392,20	627,40	61,53	
	A24	1022,50	449,90	572,60	56,00	
163(8h)	A25	1020,00	252,40	767,60	75,25	74,03
	A26	1012,10	271,90	740,20	73,14	
	A27	1015,40	267,10	748,30	73,70	

Nota: Los resultados de los demás cementos asfálticos en esta condición se pueden observar en Anexo D.

5.3 Análisis de Resultados

En esta sección se muestran cada una de las gráficas de los ensayos realizados.

Las curvas de estado ayudarán a entender de una mejor manera los resultados de cada ensayo, brindando una explicación clara del significado de los datos obtenidos y permitiendo observar como varía el comportamiento mecánico de cada ligante asfáltico.

5.3.1 Resultados de susceptibilidad térmica

5.3.1.1 Curvas de Estado (Porcentaje de pérdidas al cántabro-temperatura)

Como se ha comentado en el capítulo anterior una de las funciones del Método UCL es comparar los cementos asfálticos, sean convencionales o modificados.

En la Figura 25 se han representado las curvas de estado de los ligantes ensayados, la cual se obtiene variando la temperatura a la que se realiza el ensayo y observándose en estas (curvas), la diferencia entre los ligantes asfálticos. Esta Figura muestra el comportamiento de los ligantes en un amplio rango de temperaturas, altas pérdidas equivalen a un comportamiento frágil del ligante, pérdidas bajas corresponden a un comportamiento elasto-plástico e inconsistente cuando se presenta un fuerte incremento de pérdidas al Cántabro.

La mayor o menor pendiente de esta curva de estado nos indica la susceptibilidad del ligante a los cambios de temperatura y es importante observar las pérdidas por degaste al Cántabro que sufrieron las probetas para darse cuenta que cemento asfáltico presentó un mejor desempeño, observándose muy buenos resultados del AC-20 Mod-SBS, pero recalcando las mejoras significativas que resultaron cuando al AC-20 se le adicionó distintas proporciones de cal hidratada, ya que las probetas reflejaron menores pérdidas en casi todas las temperaturas en comparación con los demás ligantes.

Como se mencionó anteriormente, en los ensayos al AC-30 hubo variaciones en algunas temperaturas lo cual se puede observar en la Figura 25, pero para comparar su comportamiento con los demás cementos asfálticos se ideó proyectar su curva de estado a las temperaturas en la cual no se ensayó, un ejemplo de ello fue que se proyectó hasta 70 °C al igual que los demás, pero cabe recalcar que ese valor entre 60 y 70 °C no es real, sino un valor el cual fue

asumido con el fin de hacer una mejor comparación entre todos los ligantes ensayados.

Nota: El porcentaje de pérdidas del AC-30 representado en la siguiente Figura, es el promedio de la Lata 1 y Lata 2. En Anexo C se pueden observar el comportamiento de estas.

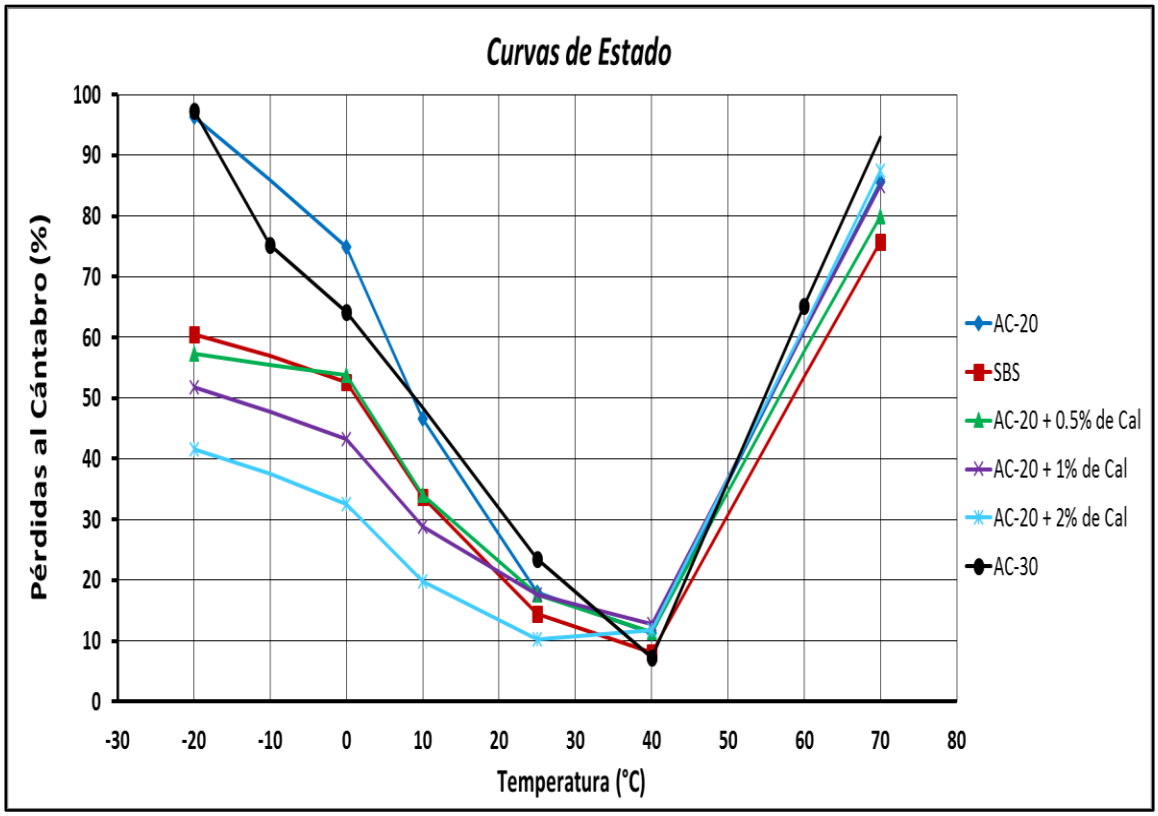


Figura 25. Susceptibilidad térmica de los cementos asfálticos evaluados. Fuente: (Elaboración propia)

AC-20 vs AC-30 vs SBS

Si se comparan los resultados de los cementos asfàlticos convencionales (AC-20 y AC-30) con los del AC-20 Mod-SBS se observa que las pérdidas por desgaste tanto en bajas como en altas temperaturas son menores en el cemento asfáltico modificado con polímero (Figura 26), presentando el modificado, un mayor poder aglomerante conservándose en distintas condiciones de temperaturas al que fue sometido.

El cemento asfáltico modificado en temperaturas bajas (-20 °C) tuvo un porcentaje de pérdidas de un 60%, en cambio los convencionales en esta misma temperatura presentaron aproximadamente 97% de pérdidas desintegrándose casi en su totalidad las probetas ensayadas. Cuando se elevó la dureza de los convencionales los hizo más susceptible a pérdidas a bajas temperaturas, lo cual indica que se ve afectada más la cohesión y por lo tanto se ve afectada la durabilidad, el desempeño de la mezcla asfáltica y su nivel de servicio en el firme.

Los 3 en la zona de temperaturas intermedias, entre 25 y 40 °C se comportaron de forma similar y en temperaturas altas, a 70 °C, el modificado presentó menores pérdidas, esto demuestra el mejor desempeño que tiene sobre los otros, lo cual sirve de referencia de manera que se establece el comportamiento que le proporcionará a la mezcla asfáltica en distintas temperaturas.

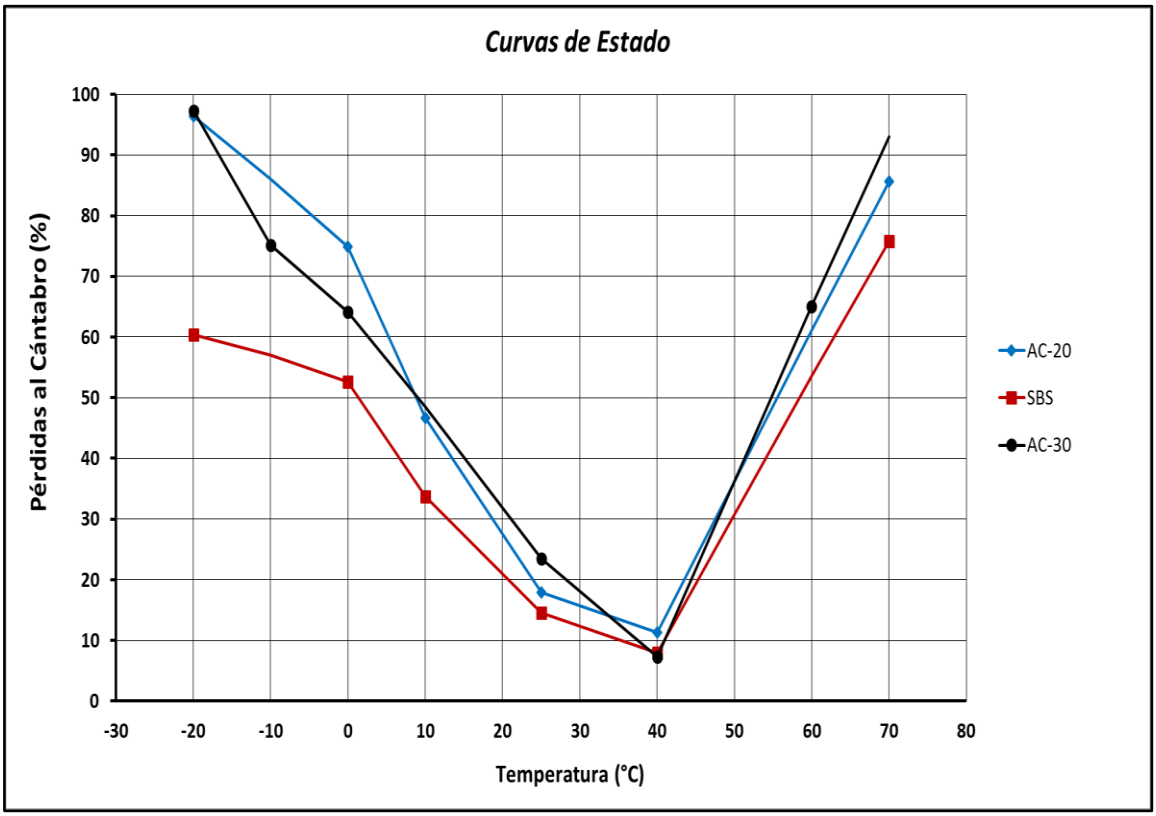


Figura 26. Comparación entre los C.A convencionales y el modificado con polímeros. Fuente: (Elaboración propia)

AC-20 + Cal

El resultado de la adición de cal hidratada a la mezcla asfáltica compuesta por un AC-20 se indica en la Figura 27.

Como se explicó anteriormente en la fase de la confección de las probetas (5.2.6.3), el proceso consistió en adicionarle cal hidratada en 3 distintas proporciones y como resultado se observa que la mejor relación cemento asfáltico/cal fue cuando se utilizó 2% de esta (cal), ya que reflejó un mejor comportamiento a bajas temperaturas. Y en altas temperaturas fue un poco similar con respecto a las dos proporciones utilizadas también en este estudio. El buen desempeño del asfalto más cal, indica una reducción de deterioros en las carreteras en épocas lluviosas.

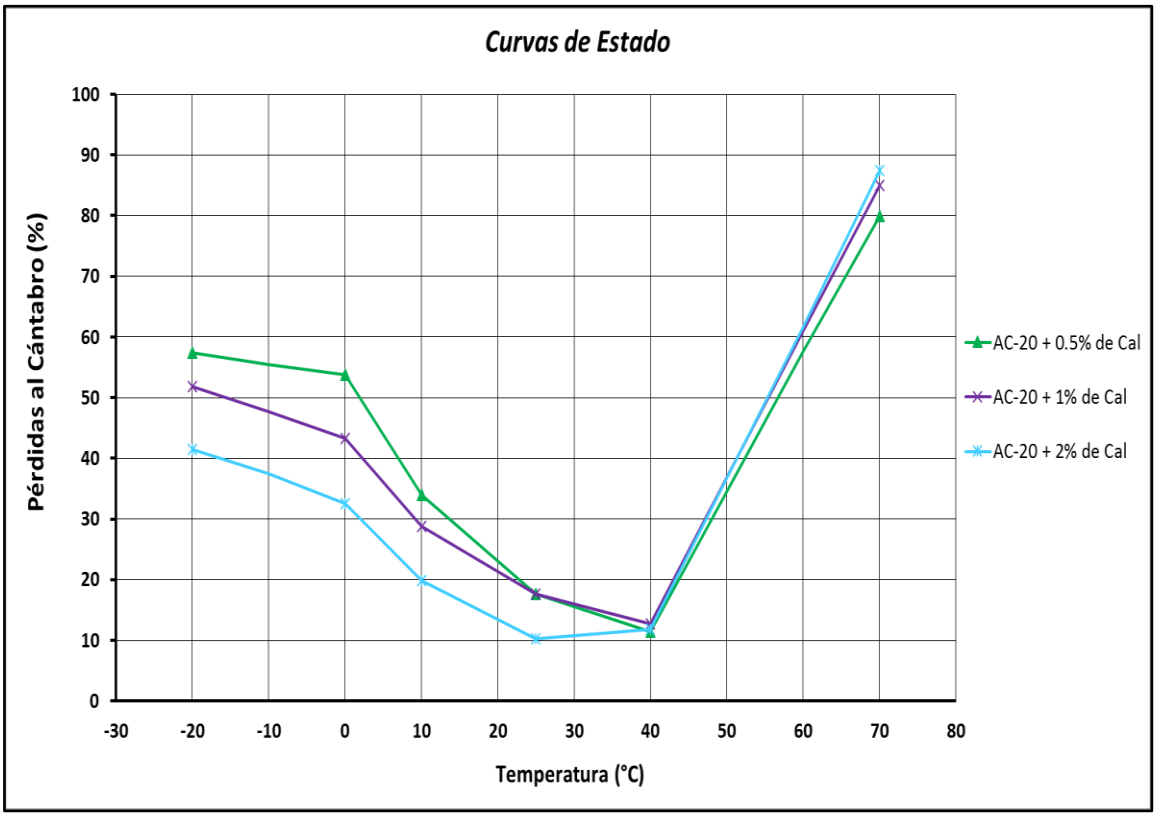


Figura 27. AC-20 más 3 distintas proporciones de cal hidratada. Fuente: (Elaboración propia)

AC-20 vs AC-20 + Cal

El AC-20 evidenció ser más débil a bajas temperaturas, pero cuando se le adicionó cal hidratada, sus pérdidas se redujeron ampliamente. Ver Figura 28.

Se observa una gran diferencia de valores en los resultados cuando a un cemento asfáltico se le adiciona cal, esto hace que mejore sus propiedades optimizando así su comportamiento a distintas temperaturas, ayudando a la cohesión de la mezcla y haciendo que exista un buen mástico (filler-betún).

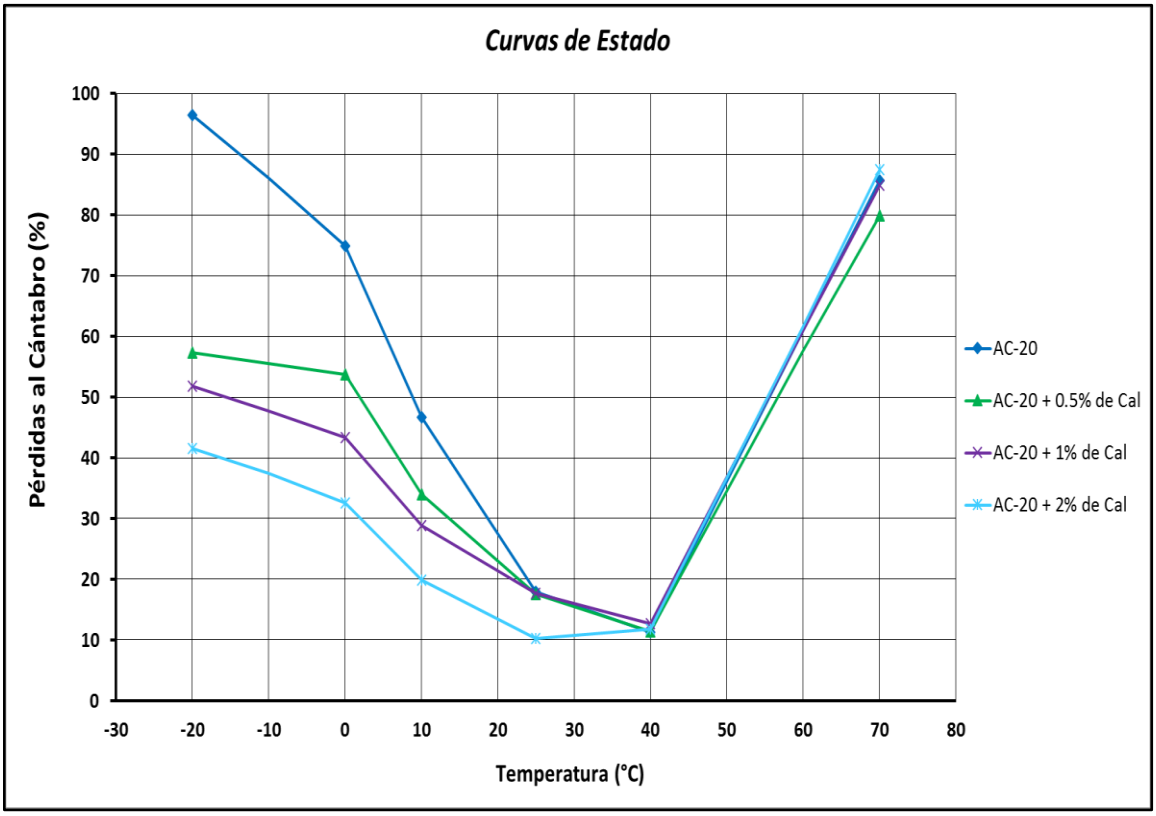


Figura 28. Comparación entre AC-20 y este mismo AC-20 pero adicionándole 3 distintas proporciones de cal. Fuente: (Elaboración propia)

SBS vs AC-20 + Cal

En la Figura 29 se observa la comparación entre los resultados del asfalto convencional más cal y el modificado con polímero, presentando el primero menores porcentajes de pérdidas por desgaste a bajas temperaturas y en las temperaturas comprendidas entre el rango de 40 a 70 °C la variación de resultados fue muy poca, resaltando un mejor comportamiento de la proporción de 2% de cal en comparación con las otras 2 proporciones y además por encima del ligante modificado con SBS.

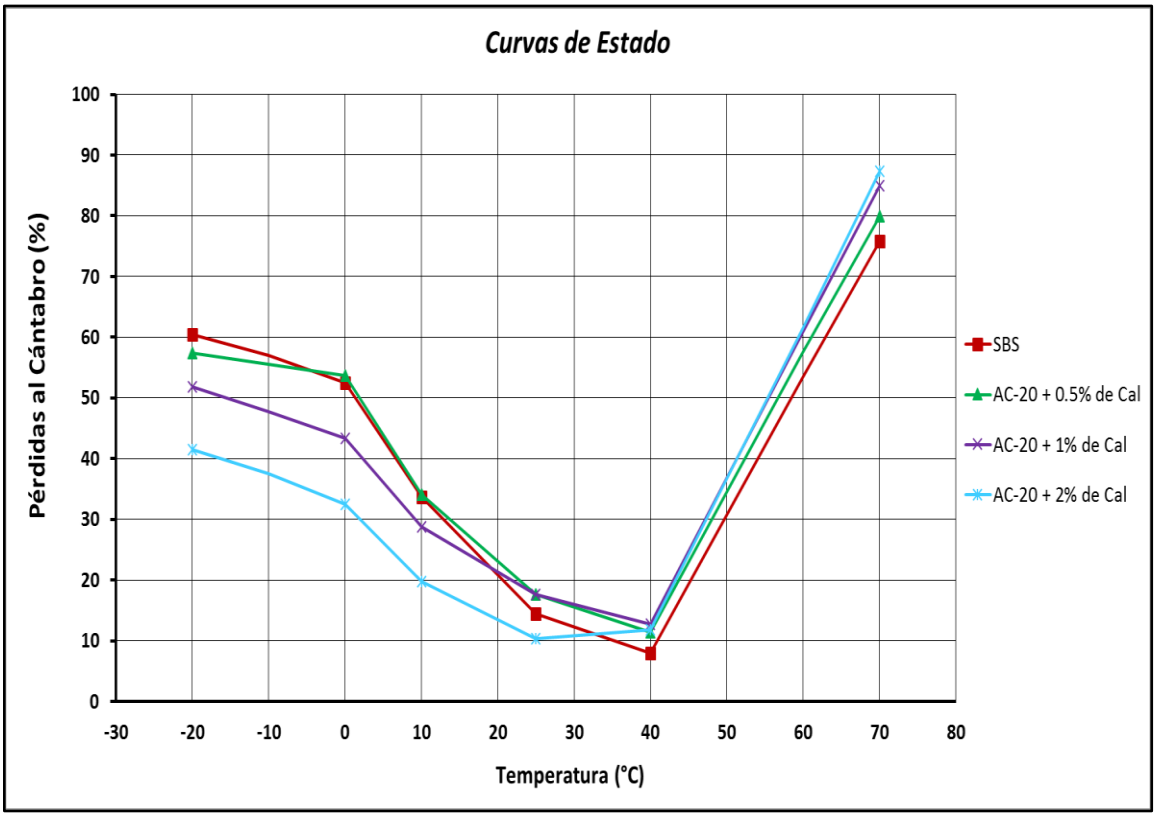


Figura 29. Comparación entre AC-20 Mod-SBS y AC-20 más 3 distintas proporciones de cal. Fuente: (Elaboración propia)

5.3.2 Resultados de envejecimiento

5.3.2.1 Curva de Estado (Porcentaje de pérdidas al cántabro-tiempo)

En los procesos de manejo, fabricación y tendido de la mezcla asfáltica a temperaturas mayores de 120 °C, el cemento asfáltico sufre un envejecimiento mediante el cual tiende a rigidizarse, pierde su flexibilidad, pierde su elasticidad y la cohesión que le aporta a la mezcla asfáltica se ve reducida.

La Figura 30 muestra la pérdida de cohesión de los cementos asfáltico después del proceso de envejecimiento, permitiendo ver cuál es la tendencia de estos en cuanto a mantener la cohesión en la mezcla asfáltica y observándose las pérdidas al Cántabro de las probetas cuando los ligantes se envejecieron durante 4 y 8 horas, presentando mayores pérdidas en un tiempo más prologando de envejecimiento del ligante asfáltico, debido a que se van perdiendo las propiedades de este.

Las mayores pérdidas al Cántabro en comparacion con los demás las presenta el AC-30,despuès le sigue el AC-20,pero al adicionarle ciertos porcentajes de cal hidratada a este ligante bituminoso, se observa una disminución en las pérdidas,lo cual puede dar una visión de que habrá una durabilidad en la mezcla asfáltica a la hora de enfrentar el deterioro de los pavimentos flexibles debido a los procesos de envejecimiento.

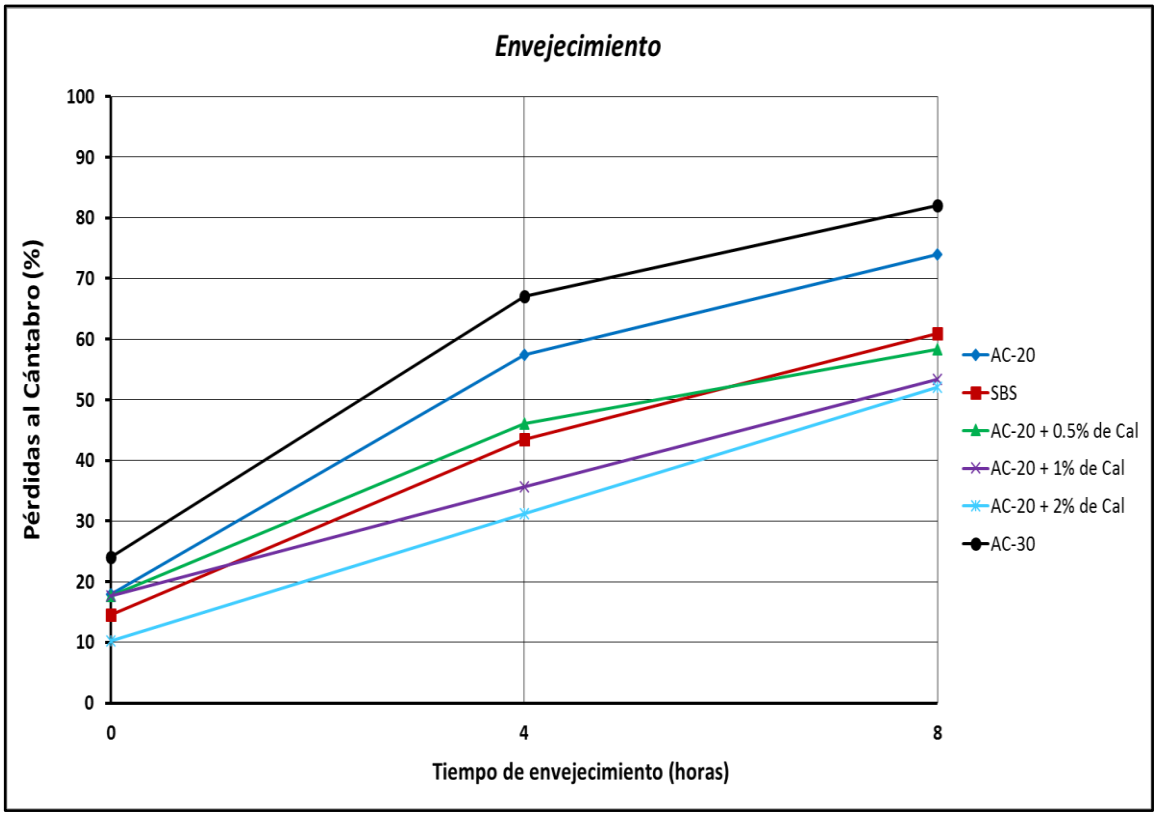


Figura 30. Curvas de envejecimiento de los cementos asfálticos evaluados. Fuente: (Elaboración propia)

5.3.3 Resultados de adhesividad

Se sabe que la mezcla asfáltica esta propensa a recibir muchos daños pero se podría decir que uno de los principales se debe a la presencia de humedad, lo que ocasiona que se pierda la cohesión entre el ligante asfáltico y el material pétreo.

En la Figura 31 se pueden ver las pérdidas por desgaste al cántabro de las probetas que fueron sometidas a una condición húmeda a 60 °C, haciéndose

una comparación de estas con respecto a los resultados que se obtuvieron de las probetas en seco a 25 °C. De esta manera se evalúa la adhesividad entre los cementos asfálticos y los agregados.

En presencia de humedad las pérdidas que sufren las probetas de AC-20 Mod-SBS son menores que las probetas compuestas de los demás cementos asfalticos, reflejándose claramente una diferencia de resultados.

La mezcla más afectada por el agua es la compuesta por AC-30, presentando pérdidas elevadas e indicando ser muy sensible a esta condición.

El AC-20 sin cal sufre pérdidas significativas comparadas con las de AC-20 más distintas proporciones de cal hidratada. Estos resultados reflejan que al adicionarle cal hidratada se está logrando mejorar la adherencia del cemento asfáltico ante la presencia del agua, mitigando el daño que esta produce a la mezcla y previniendo la aparición de baches en los pavimentos.

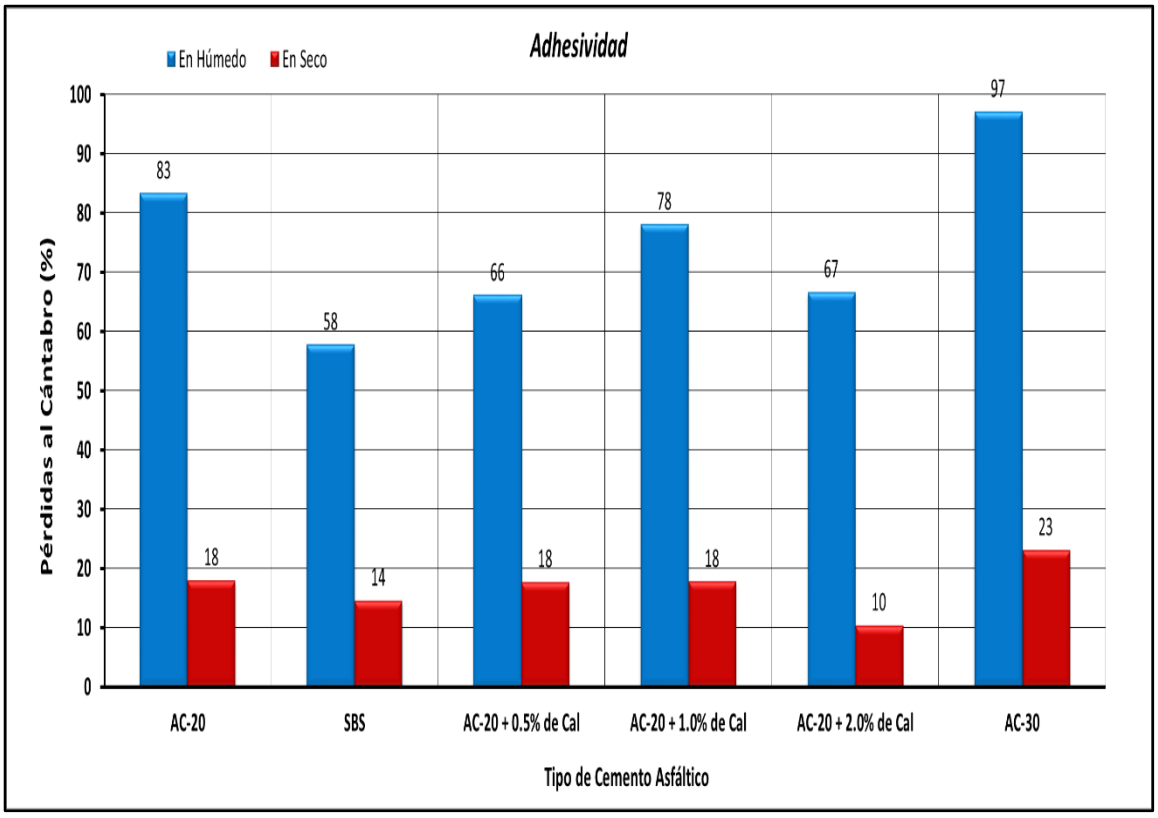


Figura 31. Pérdidas al Cántabro en húmedo y en seco. Fuente: (Elaboración propia)

5.4 Ensayos Adicionales

Cuando se le adicionó cal hidratada en 3 distintas proporciones al AC-20 hubieron resultados muy buenos, pero en algunas condiciones de temperatura no se estaba dando un buen mástico filler-betún para que hubiera cohesión, es por ello que se procedió a experimentar con 3 proporciones más de cal, sometiendo las probetas elaboradas a la temperatura de 70 °C, ya que en esta condición fue donde las probetas con las primeras proporciones de cal sufrieron mayores pérdidas.

En la Tabla 13 se presenta el resultado de este ensayo adicional, donde se observa el porcentaje de desgaste al Cántabro en los 3 casos (AC-20 más 2%, 5% y 5.5% de cal hidratada) y se aprecia que sus pérdidas se minimizaron en comparación con los resultados obtenidos primeramente.

Se puede decir que incrementar el contenido en peso de cal hidratada, ayudó a que hubiera una mejor cohesión en la mezcla asfáltica, previniendo el desprendimiento de los agregados en las probetas a la hora que fueron sometidas al impacto que reciben en la máquina de desgaste de los Ángeles.

Tabla 13. Cemento asfáltico convencional AC-20 con 2%, 5% y 5.5% de cal hidratada en la mezcla. Fuente: (Elaboración propia)

Temp. Probeta (°C)	Probeta No.	Cal Hidratada (%)	Alturas de Probetas			Altura Promedio (cm)	Alturas de Probetas		Dif. en Peso (g)	Desgaste (%)
			h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)		Inicial (g)	Final (g)		
70	1	2.0	69.90	66.68	66.70	6.68	1032.1	225.6	806.5	78.1
70	2	5.0	65.80	66.20	66.00	6.60	1029.3	122.3	907.0	88.1
70	3	5.5	67.06	66.78	66.80	6.69	1037.4	182.5	854.9	82.4

5.5 Encuesta Realizada a Empresas del País

Una de tantas ventajas de este método es que no requiere de equipos especiales, así que puede ser aplicado en nuestro país. Para constatar que su desarrollo es posible, se hizo una encuesta en algunas empresas vinculadas a

trabajos con mezclas asfálticas. En la Tabla 14 se muestra los resultados de la encuesta.

En las visitas a las empresas, se les preguntó si tenían conocimiento del método, obteniendo como respuesta que no sabían de él, pero hay que destacar que todas cuentan con la mayoría de los equipos necesarios para su implementación.

Tabla 14. Encuesta realizada a empresas. Fuente: (Elaboración propia)

Equipos	Empresas				
	INSUMA	LAMSA	NICASOLUM	AGRENIC	INGENIEROS CONSULTORES CENTROAMERICANOS S.A
Tamices	✓	✓	✓	✓	✓
Balanzas	✓	✓	✓	✓	✓
Estufa	✓	✓	✓	✓	✓
Moldes Cilíndricos	✓	✓	✓	✓	✓
Compactador Marshall	✓	✓	✓	✓	✓
Extractor de Probetas	✓	✓	✓	✓	✓
Hornos	✓	✓	✓	✓	✓
Tina de Curado	✓	✓	✓	✓	✓
Congeladores	✓	✓	✓	✓	✓
Máquina de los Ángeles	✓	✓	✓	✓	-
Cuarto Frío	-	-	-	-	-

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

Capítulo 6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

- El Método UCL es una alternativa de caracterización de cementos asfálticos convencionales o modificados, muy sencilla y completa.
- Brinda resultados claros, concisos y de fácil interpretación.
- Mediante el concepto de pérdidas por desgaste al Cántabro, permite establecer el comportamiento de los cementos asfálticos a distintas temperaturas, bajo la acción del agua y el envejecimiento.
- Evalúa la variación que sufre un cemento asfáltico al adicionarle cal hidratada entre ellas:
  - ✓ Minimiza el daño que la humedad produce al pavimento es decir actúa como impermeabilizante.
  - ✓ La cal hidratada sustituye al filler de la mezcla asfáltica.
  - ✓ Reduce el contenido de asfalto.
  - ✓ Mejora la afinidad entre el material asfáltico y el agregado pétreo.
  - ✓ Mejora la rugosidad y la resistencia a la fatiga a bajas temperaturas.
  - ✓ Reduce el envejecimiento del ligante asfáltico.
  - ✓ Incrementa la estabilidad y la durabilidad de la mezcla.
- No requiere de equipos especiales.
- De las empresas visitadas, todas cuentan con el 98% de los equipos necesarios para su desarrollo. Se puede implementar.
- El cemento asfáltico convencional AC-20 presentó un desgaste mucho mayor a temperaturas extremas que a temperaturas ambientales, lo que indica que a temperaturas mínimas y máximas se ve afectada las propiedades de cohesión, esto indica cual será su trabajabilidad en el firme.

- Se puede decir que al tener un buen comportamiento tanto a bajas como a altas temperaturas como es el caso del AC-20 Mod-SBS, este será menos susceptible a los cambios de temperatura, teniendo una gran capacidad de trabajar bajo esas condiciones.

- Al modificar el cemento asfáltico convencional AC-20 con cal hidratada, se logró un comportamiento muy bueno y puede esperarse una durabilidad en el firme cuando se utilice una mezcla asfáltica con este componente, evitando o minimizando los fallos en la mezcla asfáltica.

- El comportamiento del cemento asfáltico convencional AC-30, fue de baja calidad casi en todas las condiciones a las que se sometió en comparación con los demás, es decir no tendrá un buen desempeño en los pavimentos cuando se enfrente a cambios bruscos de temperatura, la mezcla compuesta por él se verá afectada por muchos factores (entre ellos la humedad), acortando su durabilidad.

- Al comparar los dos cementos asfalticos convencionales AC-20 y AC-30, se puede decir que en este estudio presentaron comportamientos similares en el amplio rango de temperaturas, pero el AC-30 se vió más afectado en los procesos de envejecimiento y bajo la acción del agua.

- Comparando los cementos asfálticos convencionales con los modificados, ya sea con polímero SBS o con cal hidratada, se puede concluir que es de mucha importancia modificar las propiedades de los asfaltos, para obtener un mejor desempeño en los pavimentos flexibles.

- A mayor tiempo de envejecimiento del ligante, este va perdiendo sus propiedades.

6.2 Recomendaciones

- Implementar la Metodología Universal de Caracterización de Ligantes en Nicaragua que brinda resultados claros del comportamiento de mezclas asfálticas en diferentes condiciones.

- Ser rigurosos en el control de calidad de los cementos asfálticos.

- Capacitar al personal de las empresas a familiarizarse con equipos y ensayos que se elaboran a nivel mundial.

- Implementar la utilización de la cal hidratada como agregado que reemplace al filler en la mezcla asfáltica.

- Que todas las empresas productoras de cal existentes en el país cumplan con las normas internacionales y se registren en la entidad correspondiente.

- Que el Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI), tenga su laboratorio para verificar si las empresas supervisoras cumplen con los estándares internacionales.

- Que los laboratorios de las empresas privadas completen el 100% de los equipos que requiere el Método UCL y este por su sencillez sea utilizado como control de calidad.

- Realizar ensayos al AC-30 a las temperaturas que no pudieron ser evaluadas en este estudio (70 °C) y también evaluar la adición de la cal hidratada a este mismo para obtener un mejor desempeño en los pavimentos flexibles prolongando su vida útil.

Bibliografía

[1] ASTM, “Road and Paving Materials Vehicle-Pavement Systems”, Seccion 4, Vol. 04.03 (2009).

[2] AASHTO, “Standard Specifications for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing”, 22nd Edition, Part 2A: Test (2002).

[3] SCT. (2000), “MMP. Método de Muestreo y Pruebas de Materiales, Materiales para Pavimentos”. Secretaría de Comunicaciones y Transporte, México.

[4] Asphalt Institute, Serie de Manuales No. 22 (MS-22). Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente, Lexington, KY, EEUU.

[5] Asphalt Institute, Antecedentes del Diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas de SUPERPAVE, Lexington, KY, EEUU (1994).

[6] Fonseca Rodríguez, C., (2000), “Manual de Laboratorio de Asfalto, Primera Edición”, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, ITEMS, Campus Monterrey, N.L., México.

[7] Fonseca Rodríguez, C., (2011), “Proyecto Estructural de Pavimentos Asfálticos”. Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, A.C., México, D.F.

[8] Fonseca Rodríguez, C. y Villalobos Dávila, R., (1999) “Estudio experimental en laboratorios aplicando el método UCL en la caracterización de cementos asfálticos en México”. Monterrey, Nuevo León, México.

[9] Fonseca Rodríguez, C., (2006) “Aplicación de cal viva y cal hidratada en la construcción de capas de pavimentos flexibles: Evaluación de mejoras en las propiedades mecánicas de los materiales”. Monterrey, Nuevo León, México.

[10] Fonseca Rodríguez, C., Carvajal Ayala, P. y Villalobos Dávila, R., (2003) “Cementos asfálticos ecuatorianos modificados con polímeros: Caracterización y evaluación de sus propiedades cohesivas”. Monterrey, Nuevo León, México.

[11] Miró Recasens, R. & Pérez Jiménez, F., (1994) "Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo Cántabro". Tesis Doctoral. ETSECCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

[12] Cabrera Huante, M., (2008) "Análisis de un asfalto tipo AC-20 por medio del método UCL (Método Universal de Caracterización de Ligantes)". Tesis. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

[13] Bianchetto, H., Pérez Jiménez, F. & Miró Recasens, R., (2007) "Resistencia al envejecimiento de las mezclas asfálticas bituminosas en caliente: Beneficios y limitaciones de la incorporación de fillers comerciales. Primera parte: estudios en base al Método UCL". Universidad Nacional de la Plata, Argentina.

[14] Alarcón Ibarra, J., (2007), "Estudio de la afinidad de un agregado basáltico triturado utilizando asfaltos convencionales y aditivos promotores de adherencia, empleando el método UCL". Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

[15] http://www.construaprende.com/docs/trabajos/310-pavimentos-flexibles?start=2

[16] http://www.e-asfalto.com/go/?publicidad.htm

[17] http://www.gmarca.com/

[18] http://www.latindex.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/viewFile/2062/2025

[19] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/maxil_c_r/capitulo2.pdf

[20] http://www.monografias.com/trabajos97/tipos-polimeros/tipos-polimeros.shtml

[21] http://sobrelacal.wordpress.com/que-es-la-cal/historia-de-la-cal/

[22] https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/14/34065-14.pdf

[23] http://www.construmatica.com/construpedia/Clasificaci%C3%B3n_de_las_Mezclas_Asf%C3%A1lticas

Anexos

Anexo A. Valores de la caracterización convencional del ejemplo expuesto acerca de la aplicación del Método UCL.

Tabla 1. Características de los cementos asfálticos originales.

Designación SCT	Características del cemento asfáltico	MOD-SBS	AC-20 (Cadereyta)
Del cemento asfáltico original			
	Densidad Relativa	1.027	1.033
M-MMP-4-05-006	Penetración a 25°C, 100g, 5s. (10^{-1} mm)	60.5	59.5
M-MMP-4-05-007	Punto de inflamación Cleveland (°C)	255	235
M-MMP-4-05-009	Punto de Reblandecimiento (°C)	55.3	50.0
	Índice de penetración	0.55	-0.77
M-MMP-4-05-011	Ductilidad a 25°C y 5cm/min, (cm)	70.0	149.0
M-MMP-4-05-010	Viscosidad rotacional Brookfield, 135°C, (cP)	1.142	0.604
M-MMP-4-05-010	Viscosidad rotacional Brookfield, 175°C, (cP)	0.350	0.158
	Recuperación Elástica por Torsión a 25°C, (%)	35.5	6.0

Anexo B. Caracterización convencional de los cementos asfálticos evaluados en este estudio.

Tabla 2. Propiedades mecánicas y reológicas del AC-20. Fuente: (Elaboración propia)

Características del cemento asfáltico	Unidad	Resultados
Densidad Relativa	g/cm3	1.029
Penetración a 25°C, 100g, 5 segundos	0.1 mm	61
Punto de Reblandecimiento Anillo y Bola	°C	48
Índice de Penetración	-	-1.25
Ductilidad a 25°C y 5cm/min	cm	139.4
Recuperación Elástica por Torsión a 25°C	%	8.8
Viscosidad Rotacional Brookfield,135°C	cP	520.8
Viscosidad Rotacional Brookfield,175°C	cP	83.3
Recuperación Elástica por Ductilómetro, 25°C, 20cm	%	10

Tabla 3. Propiedades mecánicas y reológicas del AC-20 Mod-SBS. Fuente: (Elaboración propia)

Características del cemento asfáltico	Unidad	Resultados
Densidad Relativa	g/cm3	1.037
Penetración a 25°C, 100g, 5 segundos	0.1 mm	40
Punto de Reblandecimiento Anillo y Bola	°C	57
Índice de Penetración	-	-0.11
Ductilidad a 25°C y 5cm/min	cm	66.6
Recuperación Elástica por Torsión a 25°C	%	57.8
Viscosidad Rotacional Brookfield,135°C	cP	1708
Viscosidad Rotacional Brookfield,175°C	cP	300
Recuperación Elástica por Ductilómetro, 25°C, 20cm	%	70

Tabla 4. Propiedades mecánicas y reológicas del AC-30. Fuente: (Elaboración Propia)

Características del cemento asfáltico	Unidad	Resultados	
		Lata 1	Lata 2
Densidad Relativa	g/cm3	1.024	1.025
Penetración a 25°C, 100g, 5 segundos	0.1 mm	59.5	49.0
Punto de Reblandecimiento Anillo y Bola	°C	52.0	50.0
Índice de Penetración	-	-0.25	-1.22
Ductilidad a 25°C y 5cm/min	cm	150.0	150.0
Recuperación Elástica por Torsión a 25°C	%	7.5	7.0
Viscosidad Rotacional Brookfield,135°C	cP	500.0	513.0
Viscosidad Rotacional Brookfield,175°C	cP	91.7	83.0
Recuperación Elástica por Ductilómetro, 25°C, 20cm	%	8.0	9.0

Anexo C. Curvas de estado del cemento asfáltico AC-30 (Lata 1 y Lata) y el promedio.

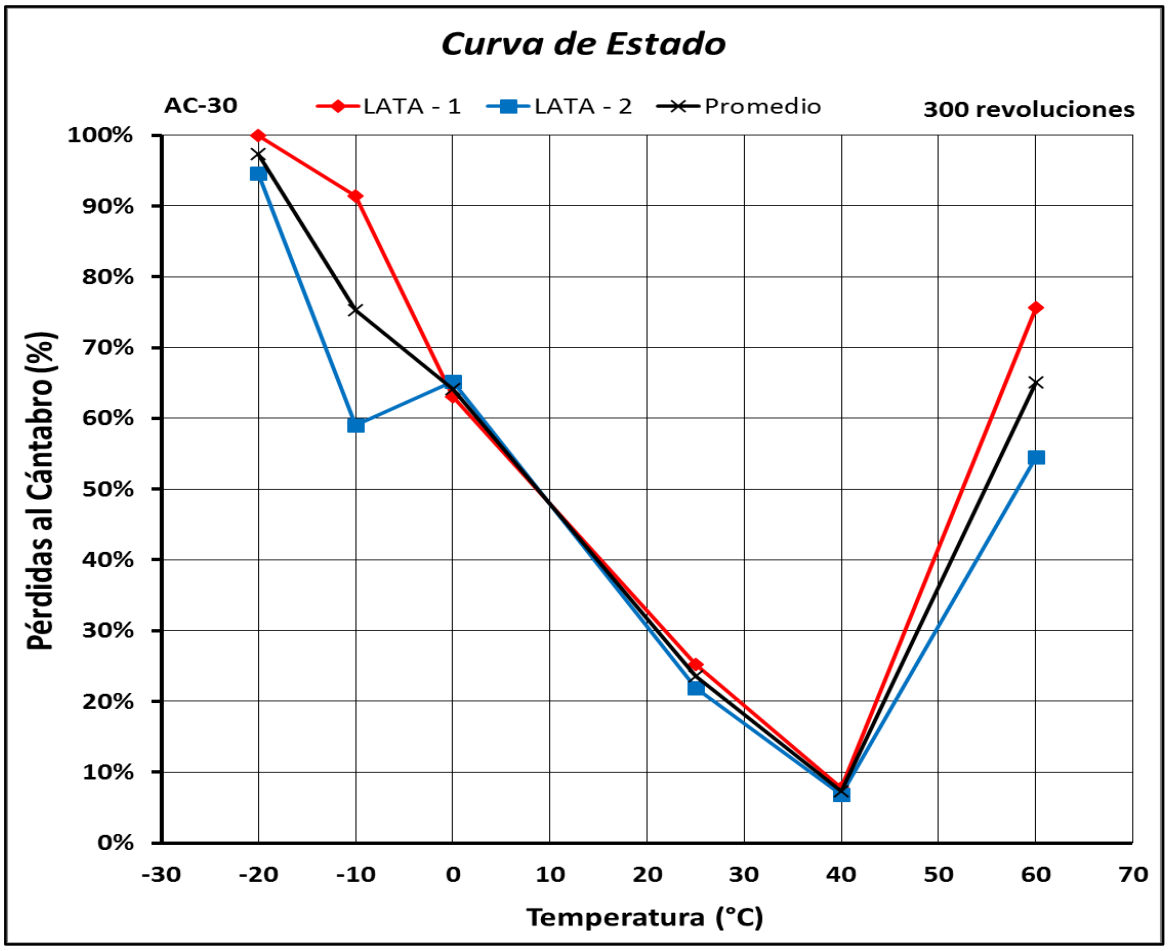


Figura 1. Susceptibilidad térmica del cemento asfáltico AC-30.

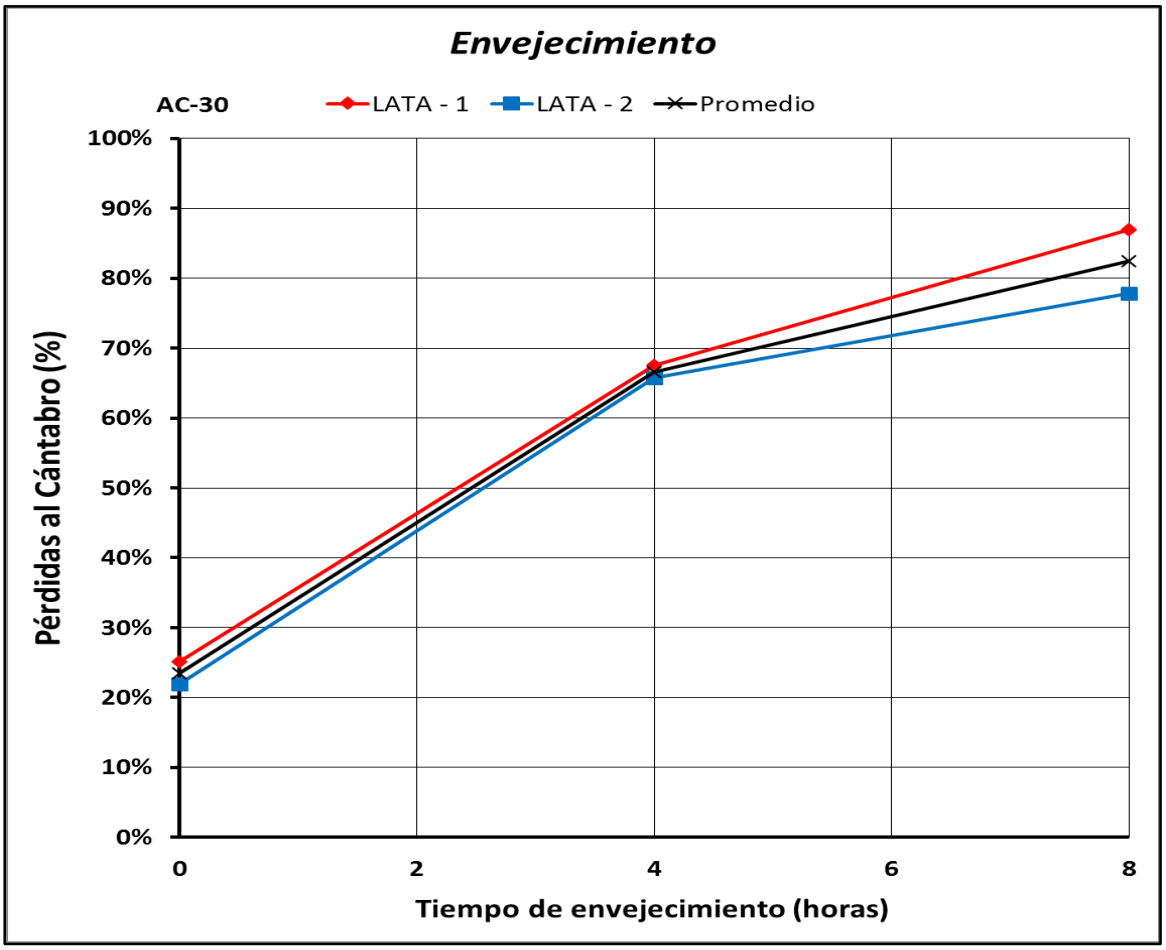


Figura 2. Curvas de envejecimiento del cemento asfáltico AC-30.

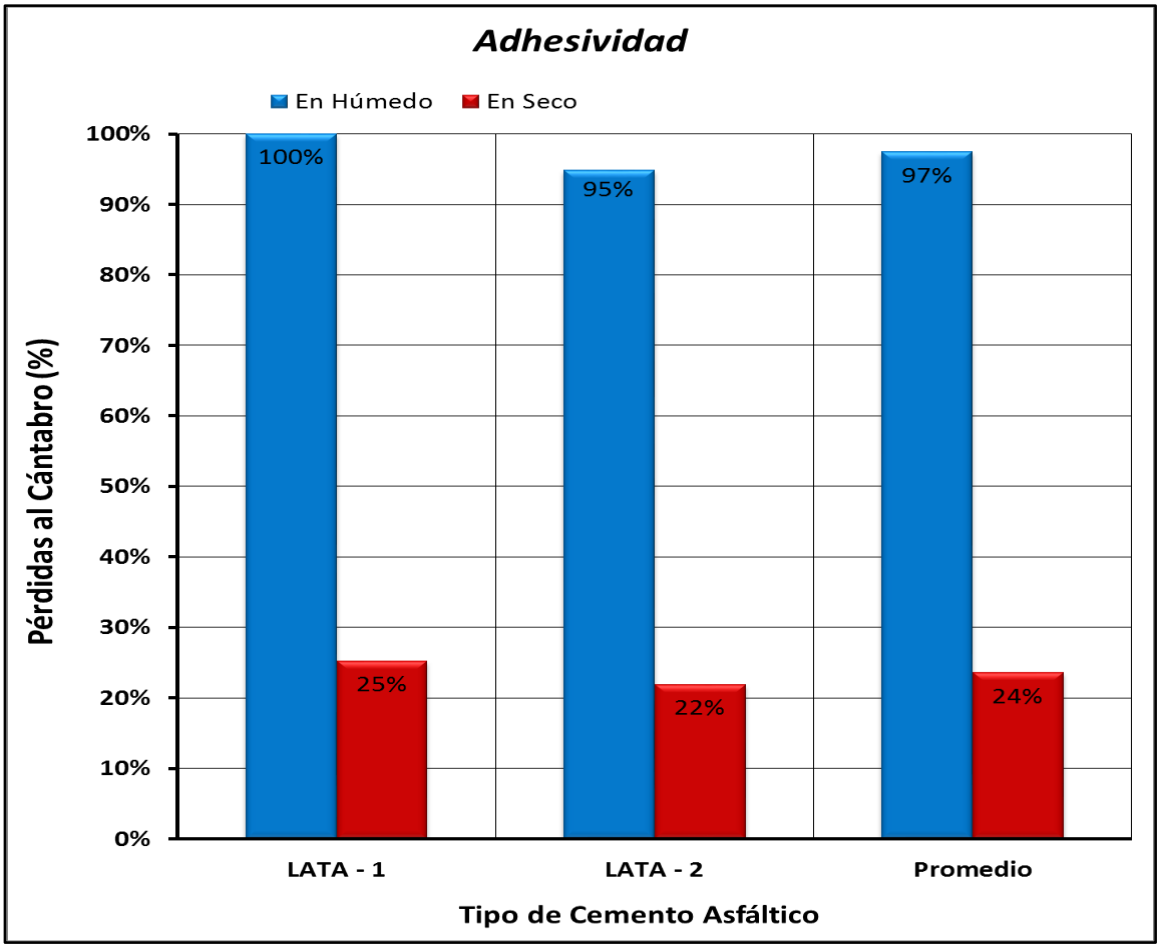


Figura 3. Adhesividad del cemento asfáltico AC-30.

Anexo D. Informe de resultados de los cementos asfálticos evaluados, utilizando el Método UCL.

Tabla 5. Informe de resultados del Método Universal de Caracterización de Ligantes con AC-20.

No Probeta	Temperatura °C	Altura de Probetas				Volumen Probeta (cm^3)	Peso Seco (g)	Densidad Aparente (g/cm^3)	Densidad Máxima (g/cm^3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desgaste (%)	Desgaste Promedio (%)
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	Promedio Alturas (cm)									
A1	-20	70.86	70.68	70.30	7.06	572.48	1021.20	1.784	2.648	32.63	1021.50	110.60	89.17%	96.39%
A2	-20	69.88	69.74	69.84	6.98	566.05	1033.70	1.826	2.648	31.04	1034.10	0.00	100.00%	
A3	-20	70.98	70.98	70.98	7.10	575.46	1025.90	1.783	2.648	32.70	1026.50	0.00	100.00%	
A4	0	69.66	69.76	69.48	6.96	564.54	1014.40	1.797	2.648	32.14	1014.90	277.20	72.69%	74.88%
A5	0	68.44	68.62	68.14	6.84	554.54	1007.40	1.817	2.648	31.38	1007.60	280.10	72.20%	
A6	0	70.98	70.98	71.16	7.10	575.94	1027.90	1.785	2.648	32.59	1028.40	208.30	79.75%	
A7	10	68.54	68.62	68.44	6.85	555.62	1023.60	1.842	2.648	30.44	1024.00	587.80	42.60%	46.65%
A8	10	71.66	71.56	71.94	7.17	581.46	1028.40	1.769	2.648	33.19	1029.20	531.40	48.37%	
A9	10	70.10	70.98	70.58	7.06	572.00	1033.10	1.806	2.648	31.80	1033.70	527.20	49.00%	
A10	25	68.00	68.32	68.84	6.84	554.43	1021.90	1.843	2.648	30.40	1021.90	826.00	19.17%	17.90%
A11	25	68.34	68.24	68.34	6.83	553.78	1015.50	1.834	2.648	30.74	1015.50	847.40	16.55%	
A12	25	68.24	68.14	68.14	6.82	552.70	1018.90	1.843	2.648	30.40	1018.90	835.80	17.97%	
A13	40	68.82	68.64	68.62	6.87	556.92	1022.90	1.837	2.648	30.63	1022.30	894.90	12.46%	10.82%
A14	40	68.24	68.32	68.18	6.82	553.30	1018.80	1.841	2.648	30.50	1018.10	914.30	10.20%	
A15	40	67.16	67.14	67.18	6.72	544.49	1019.60	1.873	2.648	29.30	1023.50	923.20	9.80%	
A16	70	67.14	67.20	67.18	6.72	544.60	1012.80	1.860	2.648	29.80	1005.60	138.80	86.20%	85.61%
A17	70	69.18	69.16	69.18	6.92	560.81	1020.30	1.819	2.648	31.31	1020.00	192.20	81.16%	
A18	70	68.82	68.62	68.74	6.87	557.19	1017.30	1.826	2.648	31.04	1010.50	106.30	89.48%	
A19	60 --> 25	68.94	68.82	68.94	6.89	558.59	1009.60	1.807	2.648	31.76	1049.00	82.40	92.14%	83.22%
A20	60 --> 25	71.16	71.64	71.86	7.16	580.11	1017.60	1.754	2.648	33.80	1059.30	225.80	78.68%	
A21	60 -->25	68.18	68.14	68.16	6.82	552.59	1015.20	1.837	2.648	30.63	1056.40	223.70	78.82%	
A22	163x4 HRS	68.19	68.18	68.18	6.82	552.78	1021.90	1.849	2.648	30.20	1021.00	463.40	54.61%	57.38%
A23	163x4 HRS	69.38	69.18	69.46	6.93	562.16	1021.00	1.816	2.648	31.42	1019.60	392.20	61.53%	
A24	163x4 HRS	68.58	68.76	68.18	6.85	555.41	1023.10	1.842	2.648	30.44	1022.50	449.90	56.00%	
A25	163x8 HRS	68.34	68.14	68.14	6.82	552.97	1022.13	1.848	2.648	30.21	1020.00	252.40	75.25%	74.03%
A26	163x8 HRS	67.14	67.34	67.34	6.73	545.41	1013.80	1.859	2.648	29.80	1012.10	271.90	73.14%	
A27	163x8 HRS	68.52	68.34	68.16	6.83	554.05	1017.80	1.837	2.648	30.63	1015.40	267.10	73.70%	

Tabla 6. Informe de resultados del Método Universal de Caracterización de Ligantes con AC-20 Mod-SBS.

No Probeta	Temperatura °C	Altura de Probetas				Volumen Probeta (cm^3)	Peso Seco (g)	Densidad Aparente (g/cm^3)	Densidad Máxima (g/cm^3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desgaste (%)	Desgaste Promedio (%)
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	Promedio Alturas (cm)									
B1	-20	68.64	68.22	68.14	6.83	554.00	1020.10	1.841	2.650	30.53	1020.30	411.30	59.69%	60.42%
B2	-20	69.18	69.62	69.16	6.93	562.00	1026.90	1.827	2.650	31.06	1026.90	400.00	61.05%	
B3	-20	68.64	68.54	68.74	6.86	556.49	1028.70	1.849	2.650	30.30	1028.80	406.20	60.52%	
B4	0	68.26	68.42	68.34	6.83	554.05	1024.80	1.850	2.650	30.19	1025.30	484.30	52.77%	52.56%
B5	0	69.18	69.18	69.64	6.93	562.11	1024.10	1.822	2.650	31.30	1024.40	474.60	53.67%	
B6	0	69.36	69.16	69.86	6.95	563.13	1020.10	1.811	2.650	31.66	1020.20	497.50	51.24%	
B7	10	69.16	69.74	69.16	6.94	562.27	1018.20	1.811	2.650	31.66	1021.50	665.10	34.89%	33.69%
B8	10	68.64	68.54	68.16	6.84	554.92	1020.70	1.839	2.650	30.60	1023.80	724.30	29.25%	
B9	10	67.42	67.12	67.52	6.74	546.06	1021.00	1.870	2.650	29.50	1023.80	645.80	36.92%	
B10	25	69.16	69.16	69.54	6.93	561.73	1023.90	1.823	2.650	31.21	1023.90	855.30	16.47%	14.49%
B11	25	68.34	68.64	68.34	6.84	554.86	1027.20	1.851	2.650	30.15	1027.20	889.20	13.43%	
B12	25	69.16	69.72	69.44	6.94	562.97	1017.00	1.806	2.650	31.85	1017.00	878.90	13.58%	
B13	40	69.16	69.16	69.64	6.93	562.00	1019.70	1.814	2.650	31.55	1019.70	937.80	8.03%	8.00%
B14	40	69.58	69.68	69.68	6.96	564.65	1024.60	1.815	2.650	31.51	1024.50	938.00	8.44%	
B15	40	69.76	69.16	69.86	6.96	564.22	1023.40	1.814	2.650	31.60	1023.50	946.50	7.52%	
B16	70	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1023.60	1.853	2.650	30.08	1018.90	258.60	74.62%	75.80%
B17	70	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1022.70	1.824	2.650	31.17	1018.50	277.80	72.72%	
B18	70	68.14	68.12	68.12	6.81	552.32	1020.10	1.847	2.650	30.30	1015.20	202.50	80.05%	
B19	60 --> 25	69.76	69.16	69.16	6.94	562.32	1020.90	1.816	2.650	31.47	1057.00	463.20	56.18%	57.67%
B20	60 --> 25	67.12	67.42	67.12	6.72	544.97	1026.00	1.883	2.650	29.00	1060.60	492.90	53.53%	
B21	60 --> 25	68.62	68.54	68.44	6.85	555.62	1025.60	1.846	2.650	30.40	1057.40	388.10	63.30%	
B22	163 X 4 HRS	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1022.60	1.824	2.650	31.17	1017.60	513.80	49.51%	43.46%
B23	163 X 4 HRS	69.16	69.66	69.64	6.95	563.35	1026.10	1.821	2.650	31.28	1020.80	582.50	42.94%	
B24	163 X 4 HRS	69.16	69.16	69.66	6.93	562.05	1029.20	1.831	2.650	30.91	1023.50	635.30	37.93%	
B25	163 X 8 HRS	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1021.10	1.848	2.650	30.26	1017.60	468.90	53.92%	60.90%
B26	163 X 8 HRS	68.14	68.62	68.94	6.86	555.89	1018.90	1.833	2.650	30.83	1015.40	394.30	61.17%	
B27	163 X 8 HRS	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1019.40	1.818	2.650	31.40	1017.00	329.50	67.60%	

Tabla 7. Informe de resultados del Método Universal de Caracterización de Ligantes con AC-20+0.5% de cal.

No Probeta	Temperatura °C	Altura de Probetas				Volumen Probeta (cm^3)	Peso Seco (g)	Densidad Aparente (g/cm^3)	Densidad Máxima (g/cm^3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desgaste (%)	Desgaste Promedio (%)
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	Promedio Alturas (cm)									
C1	-20	67.12	67.12	67.62	6.73	545.51	1015.60	1.862	2.648	29.68	1017.10	488.60	51.96%	57.36%
C2	-20	68.16	68.54	68.64	6.84	554.92	1025.60	1.848	2.648	30.21	1027.50	428.10	58.34%	
C3	-20	68.56	68.44	68.34	6.84	554.92	1026.90	1.851	2.648	30.10	1028.20	392.90	61.79%	
C4	0	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1021.50	1.849	2.648	30.17	1022.80	421.70	58.77%	53.73%
C5	0	68.34	68.14	68.54	6.83	554.05	1024.50	1.849	2.648	30.17	1025.40	491.60	52.06%	
C6	0	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1021.20	1.849	2.648	30.17	1022.60	507.60	50.36%	
C7	10	68.14	68.64	68.64	6.85	555.14	1023.10	1.843	2.648	30.40	1025.00	700.30	31.68%	34.02%
C8	10	68.14	68.64	68.14	6.83	553.78	1020.10	1.842	2.648	30.44	1022.30	668.00	34.66%	
C9	10	68.64	68.34	68.34	6.84	554.86	1026.20	1.849	2.648	30.17	1022.60	657.30	35.72%	
C10	25	69.54	69.54	69.18	6.94	562.81	1026.10	1.823	2.648	31.10	1026.10	833.20	18.80%	17.61%
C11	25	67.12	67.64	67.54	6.74	546.70	1019.90	1.866	2.648	29.53	1019.90	838.00	17.84%	
C12	25	67.12	67.54	67.42	6.74	546.11	1020.60	1.869	2.648	29.42	1020.60	855.30	16.20%	
C13	40	68.74	68.14	68.14	6.83	554.05	1021.70	1.844	2.648	30.36	1022.20	907.00	11.27%	11.42%
C14	40	67.12	67.12	67.12	6.71	544.16	1024.00	1.882	2.648	28.90	1024.20	918.20	10.35%	
C15	40	68.34	68.76	68.86	6.87	556.59	1020.70	1.834	2.648	30.70	1020.90	892.00	12.63%	
C16	70	69.96	69.16	69.18	6.94	562.92	1030.30	1.830	2.648	30.90	1026.10	190.10	81.47%	79.91%
C17	70	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1024.50	1.855	2.648	30.00	1019.00	319.00	68.69%	
C18	70	70.48	70.68	70.18	7.04	571.13	1050.90	1.840	2.648	30.50	1047.80	109.40	89.56%	
C19	60 --> 25	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1021.00	1.848	2.648	30.20	1057.20	311.90	70.50%	65.97%
C20	60 --> 25	68.42	68.64	68.14	6.84	554.54	1026.90	1.852	2.648	30.10	1062.70	425.70	59.94%	
C21	60 -->25	68.44	68.44	68.34	6.84	554.59	1023.30	1.845	2.648	30.30	1056.90	343.80	67.47%	
C22	163x4 HRS	67.12	67.42	67.12	6.72	544.97	1017.60	1.867	2.648	29.50	1006.70	561.40	44.23%	46.06%
C23	163x4 HRS	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1021.60	1.849	2.648	30.20	1011.80	544.60	46.18%	
C24	163x4 HRS	69.18	69.18	69.18	6.92	560.86	1028.40	1.834	2.648	30.80	1018.00	531.80	47.76%	
C25	163x8 HRS	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1026.00	1.857	2.648	29.90	1016.90	441.30	56.60%	58.27%
C26	163x8 HRS	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1033.20	1.870	2.648	29.38	1024.20	426.40	58.37%	
C27	163x8 HRS	68.44	68.44	68.34	6.84	554.59	1031.50	1.860	2.648	29.76	1022.30	410.70	59.83%	

Tabla 8. Informe de resultados del Método Universal de Caracterización de Ligantes con AC-20+1% de cal.

No Probeta	Temperatura °C	Altura de Probetas				Volumen Probeta (cm^3)	Peso Seco (g)	Densidad Aparente (g/cm^3)	Densidad Máxima (g/cm^3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desgaste (%)	Desgaste Promedio (%)
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	Promedio Alturas (cm)									
D1	-20	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1029.0	1.835	2.648	30.69	1023.00	526.80	48.50%	51.86%
D2	-20	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1020.7	1.848	2.648	30.22	1027.20	475.10	53.75%	
D3	-20	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1028.4	1.834	2.648	30.74	1024.90	478.20	53.34%	
D4	0	70.18	70.18	70.18	7.02	568.97	1025.2	1.802	2.648	31.95	1032.40	483.10	53.21%	43.28%
D5	0	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1028.8	1.862	2.648	29.67	1026.00	683.30	33.40%	
D6	0	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1030.0	1.837	2.648	30.63	1026.10	582.40	43.24%	
D7	10	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1027.5	1.833	2.648	30.80	1033.50	702.10	32.07%	28.81%
D8	10	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1025.3	1.856	2.648	29.91	1026.10	767.80	25.17%	
D9	10	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1032.2	1.841	2.648	30.48	1023.00	724.30	29.20%	
D10	25	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1026.8	1.831	2.648	30.84	1026.80	888.90	13.43%	17.64%
D11	25	68.14	68.16	68.14	6.81	552.49	1027.4	1.860	2.648	29.77	1027.40	811.60	21.00%	
D12	25	69.18	69.18	69.18	6.92	560.86	1031.0	1.838	2.648	30.58	1031.00	840.30	18.50%	
D13	40	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1031.5	1.840	2.648	30.53	1021.00	898.90	11.96%	12.73%
D14	40	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1027.0	1.832	2.648	30.83	1025.20	889.50	13.24%	
D15	40	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1029.8	1.864	2.648	29.60	1028.90	895.10	13.00%	
D16	70	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1027.7	1.833	2.648	30.78	1020.70	162.30	84.10%	84.92%
D17	70	68.14	68.54	68.14	6.83	553.51	1022.5	1.847	2.648	30.24	1023.70	100.00	90.23%	
D18	70	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1029.0	1.835	2.648	30.69	1019.50	199.40	80.44%	
D19	60 --> 25	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1028.1	1.834	2.648	30.76	1051.40	274.60	73.88%	77.97%
D20	60 --> 25	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1024.8	1.828	2.648	30.98	1052.10	125.80	88.04%	
D21	60 --> 25	68.54	68.14	68.66	6.84	554.92	1028.4	1.853	2.648	30.01	1063.00	297.70	71.99%	
D22	163 X 4 HRS	69.16	69.66	69.16	6.93	562.05	1027.2	1.828	2.648	30.98	1016.00	664.80	34.57%	35.62%
D23	163 X 4 HRS	69.16	69.14	69.16	6.92	560.65	1027.6	1.833	2.648	30.78	1021.00	624.60	38.82%	
D24	163 X 4 HRS	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1026.9	1.831	2.648	30.84	1024.00	681.20	33.48%	
D25	163 X 8 HRS	68.14	68.34	68.14	6.82	552.97	1021.6	1.847	2.648	30.23	1016.30	500.70	50.73%	53.35%
D26	163 X 8 HRS	68.14	68.44	68.14	6.82	553.24	1029.1	1.860	2.648	29.75	1020.10	501.30	50.86%	
D27	163 X 8 HRS	68.76	68.64	68.86	6.88	557.41	1022.1	1.834	2.648	30.75	1014.70	421.60	58.45%	

Tabla 9. Informe de resultados del Método Universal de Caracterización de Ligantes con AC-20+2% de cal.

No Probeta	Temperatura °C	Altura de Probetas				Volumen Probeta (cm^3)	Peso Seco (g)	Densidad Aparente (g/cm^3)	Densidad Máxima (g/cm^3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desgaste (%)	Desgaste Promedio (%)
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	Promedio Alturas (cm)									
E1	-20	68.94	68.14	68.14	6.84	554.59	1020.80	1.841	2.648	30.49	1023.00	607.80	40.59%	41.53%
E2	-20	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1025.30	1.856	2.648	29.91	1027.20	606.10	40.99%	
E3	-20	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1022.90	1.824	2.648	31.11	1024.90	584.00	43.02%	
E4	0	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1030.70	1.866	2.648	29.54	1032.40	703.30	31.88%	32.52%
E5	0	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1024.40	1.854	2.648	29.97	1026.00	715.10	30.30%	
E6	0	68.24	68.14	68.14	6.82	552.70	1024.30	1.853	2.648	30.01	1026.10	663.10	35.38%	
E7	10	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1031.30	1.867	2.648	29.50	1033.50	828.80	19.81%	19.82%
E8	10	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1024.70	1.855	2.648	29.95	1026.10	845.40	17.61%	
E9	10	68.14	68.14	68.44	6.82	553.24	1020.50	1.845	2.648	30.34	1023.00	797.40	22.05%	
E10	25	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1021.20	1.821	2.648	31.22	1021.20	873.00	14.51%	10.29%
E11	25	67.12	67.12	67.12	6.71	544.16	1022.10	1.878	2.648	29.07	1022.10	949.20	7.13%	
E12	25	68.16	68.16	68.16	6.82	552.59	1024.00	1.853	2.648	30.02	1024.00	929.50	9.23%	
E13	40	68.14	68.16	68.16	6.82	552.54	1016.70	1.840	2.648	30.51	1021.00	889.00	12.93%	11.79%
E14	40	68.34	68.14	68.54	6.83	554.05	1020.20	1.841	2.648	30.46	1025.20	900.60	12.15%	
E15	40	67.12	67.12	67.12	6.71	544.16	1023.10	1.880	2.648	29.00	1028.90	922.90	10.30%	
E16	70	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1021.10	1.821	2.648	31.23	1020.70	103.50	89.86%	87.40%
E17	70	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1023.90	1.853	2.648	30.01	1023.70	132.10	87.10%	
E18	70	67.12	67.12	67.12	6.71	544.16	1018.00	1.871	2.648	29.35	1019.50	150.50	85.24%	
E19	60 --> 25	69.68	69.76	69.16	6.95	563.73	1013.10	1.797	2.648	32.13	1051.40	239.20	77.25%	66.55%
E20	60 --> 25	68.42	68.14	68.52	6.84	554.22	1015.40	1.832	2.648	30.81	1052.10	423.40	59.76%	
E21	60 --> 25	68.56	68.14	68.14	6.83	553.57	1025.80	1.853	2.648	30.02	1063.00	397.20	62.63%	
E22	163 X 4 HRS	67.42	67.12	67.42	6.73	545.78	1016.80	1.863	2.648	29.64	1016.00	728.80	28.27%	31.18%
E23	163 X 4 HRS	67.12	67.12	67.12	6.71	544.16	1022.70	1.879	2.648	29.03	1021.00	702.90	31.16%	
E24	163 X 4 HRS	68.44	68.14	68.14	6.82	553.24	1025.40	1.853	2.648	30.01	1024.00	674.80	34.10%	
E25	163 X 8 HRS	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1012.90	1.834	2.648	30.76	1016.30	534.60	47.40%	52.07%
E26	163 X 8 HRS	68.14	68.14	68.14	6.81	552.43	1023.80	1.853	2.648	30.01	1020.10	484.90	52.47%	
E27	163 X 8 HRS	69.16	69.16	69.16	6.92	560.70	1020.90	1.821	2.648	31.24	1009.90	441.00	56.33%	

Tabla 10. Informe de resultados del Método Universal de Caracterización de Ligantes con AC-30, Lata 1.

No Probeta	Temperatura °C	Altura de Probetas h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	Promedio Alturas (cm)	Volumen Probeta (cm^3)	Peso Seco (g)	Densidad Aparente (g/cm^3)	Densidad Máxima (g/cm^3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desgaste (%)	Desgaste Promedio (%)
F1	60 --> 25	69.18	68.90	69.04	6.90	559.73	1033.5	1.846	2.647	30.24	1062.1	0.00	100.00%	100.00%
F2	60 --> 25	69.20	69.10	69.32	6.92	561.08	1035.4	1.845	2.647	30.28	1062.4	0.00	100.00%	
F3	60 --> 25	69.22	69.40	69.52	6.94	562.49	1032.4	1.835	2.647	30.66	1056.2	0.00	100.00%	
F4	25	69.12	68.86	68.90	6.90	559.08	1035	1.851	2.647	30.06	1035	781.20	24.52%	25.19%
F5	25	69.04	69.40	68.84	6.91	560.16	1031.6	1.842	2.647	30.43	1031.6	762.20	26.11%	
F6	25	68.90	68.54	68.80	6.87	557.35	1029.8	1.848	2.647	30.20	1029.8	773.10	24.93%	
F7	-20	68.94	68.90	68.74	6.89	558.27	1038.2	1.860	2.647	29.74	1038.5	0.00	100.00%	100.00%
F8	-20	69.38	69.58	69.70	6.96	563.89	1034.9	1.835	2.647	30.67	1035.1	0.00	100.00%	
F9	-20	69.12	69.00	69.06	6.91	559.89	1040	1.858	2.647	29.83	1040.3	0.00	100.00%	
F10	-10	69.42	69.30	69.42	6.94	562.49	1036.7	1.843	2.647	30.37	1037.1	267.10	74.25%	91.42%
F11	-10	68.74	68.72	68.54	6.87	556.70	1036.4	1.862	2.647	29.67	1036.9	0.00	100.00%	
F12	-10	68.96	69.02	68.94	6.90	559.19	1037.1	1.855	2.647	29.93	1037.5	0.00	100.00%	
F13	0	68.62	68.84	68.82	6.88	557.46	1036.4	1.859	2.647	29.76	1037.6	396.00	61.84%	63.04%
F14	0	68.90	69.30	69.26	6.92	560.65	1038.8	1.853	2.647	30.00	1039.9	372.70	64.16%	
F15	0	68.54	68.44	68.50	6.85	555.30	1035.4	1.865	2.647	29.56	1036.4	382.30	63.11%	
F16	40	69.12	68.94	69.36	6.91	560.54	1032.1	1.841	2.647	30.44	1031.1	947.00	8.16%	7.76%
F17	40	69.40	69.22	69.28	6.93	561.84	1036.1	1.844	2.647	30.33	1034.7	957.70	7.44%	
F18	40	69.52	69.44	69.40	6.95	563.08	1037.1	1.842	2.647	30.42	1035	955.50	7.68%	
F19	60	68.74	68.98	68.98	6.89	558.59	1035.7	1.854	2.647	29.95	1032	246.20	76.14%	75.67%
F20	60	69.62	69.70	69.36	6.96	563.95	1034.9	1.835	2.647	30.67	1030	288.50	71.99%	
F21	60	69.50	69.74	69.62	6.96	564.43	1035	1.834	2.647	30.73	1029.4	217.30	78.89%	
F22	163 X 4 HRS	68.24	68.32	68.14	6.82	553.19	1032.5	1.866	2.647	29.49	1029.6	344.50	66.54%	67.48%
F23	163 X 4 HRS	68.74	68.70	68.44	6.86	556.38	1032.6	1.856	2.647	29.89	1029.2	396.50	61.47%	
F24	163 X 4 HRS	69.36	69.50	69.58	6.95	563.30	1030.7	1.830	2.647	30.87	1024.7	262.20	74.41%	
F25	163 X 8 HRS	69.24	69.14	69.08	6.92	560.65	1031.9	1.841	2.647	30.47	1022.8	82.00	91.98%	86.95%
F26	163 X 8 HRS	69.00	69.16	69.46	6.92	561.08	1031.8	1.839	2.647	30.53	1026.1	195.10	80.99%	
F27	163 X 8 HRS	69.06	68.98	69.42	6.92	560.65	1030.7	1.838	2.647	30.55	1027.4	124.40	87.89%	

Tabla 11. Informe de resultados del Método Universal de Caracterización de Ligantes con AC-30, Lata 2.

No Probeta	Temperatura °C	Altura de Probetas				Volumen Probeta (cm^3)	Peso Seco (g)	Densidad Aparente (g/cm^3)	Densidad Máxima (g/cm^3)	Vacíos en M. Asfáltica (%)	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	Desgaste (%)	Desgaste Promedio (%)
		h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	Promedio Alturas (cm)									
G1	60 --> 25	68.94	68.80	68.72	6.88	557.95	1030.1	1.846	2.647	30.25	1061.3	164.10	84.54%	94.85%
G2	60 --> 25	68.90	68.68	68.64	6.87	557.30	1028.7	1.846	2.647	30.27	1059.2	0.00	100.00%	
G3	60 --> 25	68.02	68.24	68.14	6.81	552.38	1030.4	1.865	2.647	29.53	1058.9	0.00	100.00%	
G4	25	68.58	68.52	68.40	6.85	555.35	1033.1	1.860	2.647	29.72	1033.1	843.40	18.36%	21.89%
G5	25	69.24	69.16	69.52	6.93	561.89	1032.1	1.837	2.647	30.61	1032.1	788.20	23.63%	
G6	25	68.56	68.64	68.80	6.87	556.70	1031.1	1.852	2.647	30.03	1031.1	787.00	23.67%	
G7	-20	69.36	69.50	69.28	6.94	562.49	1037.9	1.845	2.647	30.29	1038.5	0.00	100.00%	94.64%
G8	-20	68.98	69.18	68.86	6.90	559.46	1036.6	1.853	2.647	30.00	1037.3	0.00	100.00%	
G9	-20	68.72	68.60	68.74	6.87	556.86	1037.7	1.863	2.647	29.60	1038.4	167.10	83.91%	
G10	-10	69.40	68.94	69.14	6.92	560.70	1038	1.851	2.647	30.06	1038.9	511.70	50.75%	59.05%
G11	-10	68.60	68.90	69.20	6.89	558.59	1036.1	1.855	2.647	29.93	1037.3	354.50	65.82%	
G12	-10	67.88	67.50	67.44	6.76	548.11	1037	1.892	2.647	28.52	1038	409.30	60.57%	
G13	0	68.84	68.68	68.80	6.88	557.57	1036.6	1.859	2.647	29.76	1038.6	395.40	61.93%	65.18%
G14	0	68.54	68.34	68.38	6.84	554.70	1037.8	1.871	2.647	29.32	1039.9	397.40	61.78%	
G15	0	68.82	68.80	68.58	6.87	557.24	1035.8	1.859	2.647	29.78	1037.7	292.30	71.83%	
G16	40	68.60	68.72	68.60	6.86	556.49	1037.3	1.864	2.647	29.58	1037.2	966.60	6.81%	6.82%
G17	40	68.16	67.88	68.00	6.80	551.41	1037.2	1.881	2.647	28.94	1036.8	956.50	7.74%	
G18	40	68.26	68.60	68.36	6.84	554.59	1033.8	1.864	2.647	29.58	1033.4	972.30	5.91%	
G19	60	67.72	67.80	67.56	6.77	548.81	1037.7	1.891	2.647	28.57	1034.3	420.30	59.36%	54.48%
G20	60	67.40	67.70	67.76	6.76	548.22	1036.3	1.890	2.647	28.59	1032.3	325.80	68.44%	
G21	60	68.72	68.70	68.74	6.87	557.14	1038.6	1.864	2.647	29.57	1034.6	666.00	35.63%	
G22	163 X 4 HRS	69.14	69.04	69.26	6.91	560.59	1029.4	1.836	2.647	30.63	1025.4	335.30	67.30%	65.72%
G23	163 X 4 HRS	68.74	68.70	68.88	6.88	557.57	1031.1	1.849	2.647	30.14	1027.9	370.90	63.92%	
G24	163 X 4 HRS	68.84	68.94	68.78	6.89	558.22	1033.3	1.851	2.647	30.07	1030.4	350.80	65.95%	
G25	163 X 8 HRS	68.68	68.74	68.64	6.87	556.86	1028.8	1.847	2.647	30.20	1024.4	262.60	74.37%	77.88%
G26	163 X 8 HRS	69.22	69.00	69.18	6.91	560.49	1029	1.836	2.647	30.64	1027.1	224.20	78.17%	
G27	163 X 8 HRS	69.36	69.22	69.30	6.93	561.78	1030.2	1.834	2.647	30.72	1027.2	194.00	81.11%	