

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL MÁSTICO
ASFÁLTICO CON DIFERENTES TIPOS DE FILLER DE LA REGIÓN
DE MORELIA, CAL Y CEMENTO, MEDIANTE EL MÉTODO
UCL®”.

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

CARLOS ALBERTO REYES NEGRETE

ASESOR:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA.

Morelia Michoacán, Marzo de 2011.

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

*Dedico especialmente este trabajo de tesis a mis padres, **Ignacio Reyes Madrigal y Eloísa Negrete Orozco** como agradecimiento por el apoyo incondicional, por la confianza depositada en mí persona y por el gran sacrificio que hicieron para que yo lograré éste gran triunfo que hoy y siempre también será de ellos. Como muestra de agradecimiento y respeto que tengo hacia ellos por creer en mí y porque a pesar de que no tuvieron la misma preparación académica que yo siempre supieron aconsejarme y alentarme a ser una mejor persona y sobre todo me enseñaron a luchar por mis ideales.*

A MIS HERMANOS:

A mis hermanos Pedro, Ana Teresa, Griselda y Luis Manuel por brindarme sus consejos y apoyo incondicional en todo momento.

A MIS ABUELOS:

A mis abuelos por haber traído al mundo a mis padres y sobre todo por brindarme su cariño, comprensión y consejos durante mis estudios, aunque no todos están físicamente conmigo pero donde quiera que estén mil gracias y que dios los llene de bendiciones.

A MI FAMILIA:

A mi familia por creer en mí, por haberme apoyado y aconsejado incondicionalmente en todo momento.

A MI PRIMO:

A mi primo Octavio Negrete por ser como un hermano para mí, por ofrecerme su amistad y apoyo incondicional, por compartir mis tristezas y alegrías, por brindarme su apoyo y por ayudarme a levantar cuando me caí por esto y más gracias.

A MIS AMIGOS:

A mis amigos con quienes compartí alegrías y tristezas, además de que me ofrecieron su amistad incondicional en las buenas y en las malas y sobre todo por ser como una segunda familia para mí.

AGRADECIMIENTOS

Gracias, primero a Dios por darme la vida y después el amor de esta, mi familia. Que me ha apoyado en momentos difíciles y ha sonreído conmigo en los momentos felices. Te doy gracias Dios por dejarme vivir, llenarme de sabiduría y fuerza para no dejarme caer en los momentos difíciles y así poder lograr este gran triunfo, a ustedes padres por enseñarme a reír, a ustedes sabiendo que no existiría forma alguna de agradecerles una vida de sacrificios, esfuerzos y amor, quiero que sientan que el objetivo alcanzado también es de ustedes y que la fuerza que me ayudo a conseguir una de mis metas es su gran amor y apoyo incondicional. Papá, mamá, nombres tan sencillos de pronunciar pero que siempre enaltecen de orgullo mi hablar por tener la fortuna de ser hijo suyo. Con todo mi amor y cariño y con mi pecho hinchado de orgullo les doy gracias por su apoyo para mi formación profesional sabiendo que esta es la herencia más grande que yo he podido recibir por esto y más mil gracias.

A la Facultad de Ingeniería Civil, recinto de sabiduría, que me permitió formar como profesional, recinto que me permitió día a día estar en sus instalaciones donde conocí y pase tantos momentos felices con mis amigos y donde conocí a tantos buenos profesores que me brindaron y transmitieron sus conocimientos para poder cumplir con mi formación. Por lo cual estaré infinitamente agradecido.

A mi asesor. El Dr. Jorge Alarcón Ibarra por brindarme su ayuda, su tiempo, su dedicación y sus conocimientos para realizar este trabajo de investigación.

A mis amigos: Berenice Jiménez Vázquez, Juan Ignacio López Pérez, Emeterio de Aquino Jacobo, Juan Antonio López Espino, Christian Conrado Hernández, José Humberto Hernández Vázquez, Joel Luz Ruíz, Jorge Navarro, Marylu Millan, Jorge Salcedo, Eder Lua, José de Jesús Espinoza, Oribel Peregrino Maldonado y Fabián por compartir conmigo buenos y malos momentos por ayudarme cuando tuve problemas en el transcurso de mi formación profesional y sobre todo por haberme brindado su amistad incondicional.

A mis Amigos y compañeros de Tesis: Mario Francisco Alvares Loya y Antonio Silva Reyes por ayudarme y brindarme su apoyo incondicional al realizar las pruebas de laboratorio para llevar a cabo el presente trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS.....	2
ÍNDICE GENERAL	4
TABLAS	7
FIGURAS	9
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	16
OBJETIVOS PARTICULARES.	16
CAPÍTULO 1 MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	18
1.1.-Mezclas asfálticas en caliente.	19
1.1.1.- Mezclas asfálticas de granulometría densa.	20
1.1.2.-Mezclas asfálticas de granulometría abierta.	20
1.1.3.-Mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA.	20
1.2.-Mezclas asfálticas en frío.	21
1.2.1.- Mezclas asfálticas de granulometría densa	21
1.2.2.-Mortero Asfáltico.	21
1.3.-Mezclas asfálticas por el sistema de riego.	22
CAPÍTULO 2 ASFALTO.....	23
2.1.-Origen del asfalto.	25
2.2.-Historia y los primeros usos del asfalto.....	25
2.3.-Asfaltos Naturales.	27
2.3.1.-Composición del Asfalto	30
2.3.2.-Asfaltos Derivados de Petróleo.....	31
2.3.3.-Obtención de Asfaltos en Refinerías:.....	31
2.4.-Cementos asfálticos.	33
2.4.1.- Requisitos de calidad para cementos asfálticos.	34
2.5.-Emulsiones asfálticas.....	36
2.5.1.- Tipos de emulsiones asfálticas.....	36
2.5.2.- Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas.	36
2.6.-Asfaltos rebajados.	40
2.6.1.- Requisitos de calidad para asfaltos rebajados.	40
2.8.-Materiales asfálticos modificados.	41
2.8.1.-Polímero tipo I	41
2.8.2.-Polímeros tipo II.....	41
2.8.3.- Polímeros tipo III.....	41
2.8.4.- Hule molido de neumáticos	42
2.9.-Cementos asfálticos Grado (PG).....	42
2.9.1.- Grado de desempeño (PG).....	42
CAPÍTULO 3 AGREGADOS PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS	45

3.1.- Definición de agregados pétreos.....	45
3.2.- Tipos de agregados pétreos.	45
3.3.- Propiedades de los agregados pétreos.	46
3.3.1.- <i>Propiedades individuales.</i>	46
3.3.2.- <i>Propiedades de conjunto.</i>	46
3.4.- Naturaleza petrológica de los agregados pétreos.....	46
3.4.1.- <i>Agregados Calizos.</i>	47
3.4.2.- <i>Agregados Silíceos.</i>	47
3.4.3.- <i>Agregados Ígneos y Metamórficos.</i>	47
3.5.- Consideraciones acerca del empleo de los agregados pétreos.....	48
3.6.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa.....	49
3.7.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría abierta.....	51
3.8.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA.	52
3.9.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para morteros asfálticos.....	53
3.10.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para carpetas por el sistema de riegos.	54
3.11.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas para guarniciones.	54
CAPÍTULO 4 FILLER.....	56
4.1.-Definición:	56
4.2.-Características deseables o de mayor interés acerca del polvo mineral (filler).	57
4.3.- Propiedades del polvo mineral como componente de las mezclas asfálticas.....	58
4.4.- Ensayos para caracterizar el filler (polvo mineral).	59
4.5.- Mezcla de asfalto y filler.....	60
CAPÍTULO 5 MÉTODO UCL[®] (MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES).....	64
5.1.- Análisis por temperatura o Susceptibilidad a la Humedad.	70
5.2.- Análisis por efecto del agua (Susceptibilidad a la Humedad).....	71
5.3.- Análisis por envejecimiento (susceptibilidad al envejecimiento).	72
CAPÍTULO 6 PRUEBAS DE LABORATORIO (FASE EXPERIMENTAL).	74
6.1.- Materiales.	74
6.2.- Fase experimental.	75
6.2.1.- Límites de consistencia.....	75
6.2.1.1.- Equipo y materiales para la prueba.	75
6.2.1.2.- Preparación de la muestra.	78
6.2.2.-Determinación del límite líquido (ω_L) por el procedimiento estándar.....	78
6.2.2.1.-Equipo y materiales.	78
6.2.2.2.- Procedimiento de prueba.....	78
6.2.2.3.- Cálculos y resultados.	81
6.2.3.- Determinación del límite plástico (ω_p).	81
6.2.3.1.- Equipo y materiales.	81
6.2.3.2.- Procedimiento de prueba.....	82
6.2.4.- Determinación del índice plástico.	84
6.2.5.- Resultados de la prueba.	84
6.2.6 Equivalente de Arena.....	97

6.2.6.1.- Equipo y materiales para la prueba.....	97
6.2.6.2.- Preparación del equipo.....	100
6.2.6.3.-Procedimiento de la prueba.	100
6.3.- Muestreo de materiales pétreos para fabricación de probetas.....	104
6.4.- Agregados pétreos para la fabricación de las probetas para el Método UCL®.	109
6.5.- Fabricación de probetas tipo Marshall.....	112
6.6.-Pre-acondicionamiento de las pastillas Marshall para la susceptibilidad a la humedad y envejecimiento.	119
6.6.1.-Pre-condicionamiento para susceptibilidad a la humedad de las probetas.	119
6.6.2.-Pre-acondicionamiento de susceptibilidad al envejecimiento de las probetas.	121
6.7.-Procedimiento de susceptibilidad térmica y descripción de la prueba de desgaste.	127
6.8.-Análisis de resultados.....	131
CONCLUSIONES.....	166
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	167

TABLAS

<i>Tabla 1 Clasificación de los asfaltos dependiendo del vehículo de aplicación.</i>	33
<i>Tabla 2 Clasificación de los cementos asfálticos según su viscosidad dinámica a 60°C</i>	34
<i>Tabla 3 Requisitos de calidad para cemento asfáltico clasificado por su viscosidad dinámica a 60°C....</i>	35
<i>Tabla 4 Clasificación de las emulsiones asfálticas</i>	37
<i>Tabla 5 Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas aniónicas.</i>	38
<i>Tabla 6 Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas</i>	39
<i>Tabla 7 Clasificación de los asfaltos rebajados.</i>	40
<i>Tabla 8 Requisitos de calidad para asfaltos rebajados.</i>	40
<i>Tabla 9 Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada y con la velocidad de operación</i>	44
<i>Tabla 10 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$)</i>	49
<i>Tabla 11 Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$)</i>	50
<i>Tabla 12 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL)</i>	50
<i>Tabla 13 Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL)</i>	51
<i>Tabla 14 Requisitos granulométricos del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría abierta</i>	51
<i>Tabla 15 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría abierta</i>	52
<i>Tabla 16 Requisitos granulométricos del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA</i>	52
<i>Tabla 17 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría discontinua, Tipo SMA</i>	53
<i>Tabla 18 Requisitos de granulometría del material pétreo para morteros asfálticos</i>	53
<i>Tabla 19 Requisitos de calidad del material pétreo para morteros asfálticos</i>	53
<i>Tabla 20 Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas por el sistema de riegos.</i>	54
<i>Tabla 21 Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas por el sistema de riegos</i>	54
<i>Tabla 22 Requisitos de granulometría del material pétreo que se utilice en mezclas asfálticas para guarniciones.</i>	55
<i>Tabla 23 Tabla de equivalencias de Tamiz.</i>	105
<i>FIGURA 23 Muestreo de material.</i>	105
<i>Tabla 24 Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL)</i>	106
<i>Tabla 25 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL)</i>	106
<i>Tabla 26 Cantidad en % para preparar una muestra para la prueba de equivalente de arena.</i>	107
<i>Tabla 27 Cantidad de material para preparar una muestra para la prueba equivalente de arena</i>	107
<i>Tabla 28 Resultados de la prueba "Equivalente de arena"</i>	108
<i>Tabla 29 Cantidad total de probetas a fabricar</i>	110
<i>Tabla 30 Cuantificación de material pétreo para las fracciones (gruesa y fina).</i>	111
<i>Tabla 31 Proceso de envejecimiento de las probetas Marshall</i>	127

<i>Tabla 32 Resultados generales para la susceptibilidad térmica.</i>	<i>163</i>
<i>Tabla 33 Resultados generales para la susceptibilidad a la humedad.</i>	<i>164</i>
<i>Tabla 34 Resultados generales de susceptibilidad al envejecimiento.....</i>	<i>164</i>

FIGURAS

FIGURA 1 Carpeta asfáltica de granulometría abierta	21
FIGURA 2 Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C ver tabla 4.....	35
FIGURA 3 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG	43
FIGURA 4 Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes bituminosos	67
FIGURA 5 Máquina de los Ángeles.....	69
FIGURA 6 Máquina de los Ángeles con el contador de la Máquina compactadora Marshall	69
FIGURA 7 Horno Eléctrico de ventilación forzada marca Humboldt.....	70
FIGURA 8 Máquina para Baño María ó Baño Marshall.....	71
FIGURA 9 Copa de Casa Grande.....	76
FIGURA 10 Acomodo del material en la copa FIGURA 11 Formación de la ranura en la determinación del Límite Líquido de Casagrande. 79	79
FIGURA 12 Forma y dimensiones de la ranura	79
FIGURA 13 Gráfica para determinar los límites de plasticidad.	80
FIGURA 14 Operación para formar el cilindro de material en la determinación del límite plástico.	82
FIGURA 15 Botella con sifón para almacenamiento de solución de trabajo.	98
FIGURA 16 Pisón	99
FIGURA 17 Habilitado del sifón.....	100
FIGURA 18 Preparación de muestras para el Equivalente de Arena	100
FIGURA 19 Material para prueba del Equivalente de arena (Probetas, capsula de aluminio, tapón y navaja de cutter para enrasar la capsula.	101
FIGURA 20 Ejemplo de la prueba "Equivalente de arena".....	102
FIGURA 21 Medición del nivel de finos.....	103
FIGURA 22 Medición del nivel de arena.	103
FIGURA 23 Muestreo de material.	105
FIGURA 24 Resultados de la prueba de "Equivalente de arena.....	108
FIGURA 25 Ubicación del Banco AGC.....	109
FIGURA 26 Muestreo y recolección de material pétreo.	109
FIGURA 27 Cribado de material pétreo.	110
FIGURA 28 Lavado, tendido y secado del material pétreo.	111
FIGURA 29 Charolas y moldes para la fabricación de las probetas Marshall.	112
FIGURA 30 Acomodo de charolas y moldes dentro del horno eléctrico de ventilación forzada.	112
FIGURA 31 Material pétreo después del pre-condicionamiento en el horno.	113
FIGURA 32 Báscula electrónica.	114
FIGURA 33 Contador del compactador Marshall.....	114
FIGURA 34 Material pétreo después del pre-condicionamiento en el horno y con el asfalto listo para comenzar a mezclarlo	115
FIGURA 35 Molde centrado en el compactador Marshall.	116
FIGURA 36 Compactación de probeta Marshall.	117
FIGURA 37 Retiro de la base de papel que se utilizo para evitar que se adhiriera mezcla a la base del molde y al pisón.....	118
FIGURA 38 Proceso de enfriamiento de probetas.	118
FIGURA 39 Identificación y marcado de las probetas.....	119

FIGURA 40 Máquina para Baño María ó Baño Marshall, con que se cuenta en el laboratorio "Ing. Luis Silva Ruelas" de la facultad de Ing. Civil de la U.M.S.N.H.	120
FIGURA 41 Máquina llena de agua para que esta adquiera la temperatura de 60°C antes de introducir las probetas Marshall.	120
FIGURA 42 Probetas Marshall después de las 24 hr en baño María y también se muestra la parrilla que se acondiciono para meter una segunda cama de probetas al Baño María.....	121
FIGURA 43 Proceso de corte y obtención de las mallas para proteger las probetas cuando sean sometidas al envejecimiento en el horno eléctrico de ventilación forzada.	122
FIGURA 44 Colocación y sujeción de la malla a lo largo de la circunferencia de la probeta.	123
FIGURA 45 Vista de la probeta una vez que se le ha colocado la malla en las caras planas de la probeta.	123
FIGURA 46 Acomodo de las pastillas en las parrillas del horno para llevar a cabo la primera ronda de envejecimiento.	124
FIGURA 47 En la segunda ronda se conservan todas las probetas de la 1er parrilla y las probetas sometidas a 8 hr de envejecimiento de la 2da parrilla y solo se sustituyen las probetas sometidas a 2 hr por otras probetas sometidas a 4 hr de envejecimiento.....	125
FIGURA 48 Tercer ronda, se conservan las probetas de la primer parrilla y solo se les da vuelta, de la segunda parrilla se conservan las probetas a 8 hrs de envejecimiento y se les da vuelta. Se sustituyen las probetas de 4 hr por las de 16 hr de envejecimiento.	125
FIGURA 49 Cuarta ronda de envejecimiento	126
FIGURA 50 Vista de las probetas en las parrillas del horno para someterlas al envejecimiento.	126
FIGURA 51 Vista de la Máquina de los Ángeles con el contador de la Máquina Marshall.	128
FIGURA 52 Obtención del Peso Inicial (Pi) y el Peso final (Pf) de las probetas con ayuda de la báscula electrónica con aproximación de 1 g.	129
FIGURA 53 Control de temperatura en el congelador.....	130
FIGURA 54 Gráfica de resultados del ensayo aplicado para susceptibilidad térmica a la Arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria.....	133
FIGURA 55 Gráfica de los resultados del ensayo para Susceptibilidad a la humedad aplicado a la arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria.	135
FIGURA 56 Gráfica comparativa de los resultados de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica de los ensayos aplicados a la arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria.	135
FIGURA 57 Gráfica de resultados del ensayo para susceptibilidad al envejecimiento aplicado a la arcilla de Ciudad Universitaria.	137
FIGURA 58 Gráfica de resultados del ensayo para susceptibilidad térmica aplicado a las probetas del Banco AGC.	137
FIGURA 59 Gráfica de resultados del ensayo aplicado a las probetas para susceptibilidad a la humedad.	140
FIGURA 60 Gráfica de comparación de resultados para los ensayos de susceptibilidad térmica y susceptibilidad a la humedad aplicados a las probetas del Banco AGC.	140
FIGURA 61 Gráfica de resultados del ensayo para susceptibilidad al envejecimiento aplicado a las probetas del Banco AGC.	142
FIGURA 62 Gráfica de resultados del ensayo para susceptibilidad térmica aplicado a las probetas fabricadas con hidróxido de calcio (Cal comercial).....	142
FIGURA 63 Gráfica de resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad aplicado a las probetas elaboradas con Cal comercial.	145

FIGURA 64 Gráfica de resultados de los ensayos de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica aplicados a las probetas elaboradas con Cal comercial.	145
FIGURA 65 Gráfica de resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad aplicado a las probetas elaboradas con Cal comercial.	147
FIGURA 66 Curva de estado del ensayo de susceptibilidad térmica para las probetas elaboradas con Cemento Portland CPC-30	147
FIGURA 67 Curva de estado del ensayo de susceptibilidad a la humedad aplicado a las probetas elaboradas con Cemento Portland CPC-30.....	150
FIGURA 68 Comparación de curvas de estado de los ensayos de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica aplicados a las probetas fabricadas con Cemento CPC-30.	150
FIGURA 69 Curva de estado del ensayo para susceptibilidad al envejecimiento aplicado a las probetas fabricadas con Cemento Portland CPC-30.	152
FIGURA 70 Curva de estado para el ensayo de susceptibilidad térmica aplicado a las probetas fabricadas con filler del Banco Cerritos.	152
FIGURA 71 Curva de estado del ensayo para la susceptibilidad a la humedad aplicado a las probetas fabricadas con filler del Banco Cerritos.	155
FIGURA 72 Comparación de Curvas de estado de los ensayos de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica aplicados a las probetas fabricadas con filler del Banco Cerritos.	155
FIGURA 73 Curva de estado del ensayo para susceptibilidad al envejecimiento aplicada a probetas fabricadas con filler del Banco Cerritos.	157
FIGURA 74 Curva de estado para el ensayo de susceptibilidad térmica aplicado a las probetas fabricadas con filler de Agregado de piedra Caliza.	157
FIGURA 75 Curva de estado para el ensayo de susceptibilidad a la humedad aplicado a las probetas fabricadas con filler de Agregado de piedra Caliza.	160
FIGURA 76 Comparación de las curvas de estado de las pruebas de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica aplicado a las probetas fabricadas con filler de agregado de piedra Caliza. ...	160
FIGURA 77 Curva de estado para el ensayo de susceptibilidad al envejecimiento aplicado a las probetas fabricadas con filler de Agregado de piedra Caliza.	162
FIGURA 78 Comparación de las probetas después de ser ensayadas.	162
Tabla 32 Resultados generales para la susceptibilidad térmica.	163
FIGURA 79 Comparación de las curvas de estado de los 6 tipos de filler, para susceptibilidad térmica.	163
FIGURA 80 Comparación de las curvas de estado para la susceptibilidad a la humedad.....	164
FIGURA 81 Comparación de las curvas de estado para susceptibilidad al envejecimiento de los 6 tipos de filler.	165

INTRODUCCIÓN

Desde que el ser humano hizo su aparición en el planeta tierra, la necesidad de abrirse camino desde el punto “A” al punto “B” ha sido de suma importancia para su desarrollo y expansión

Históricamente los primeros caminos fueron vías tipo peatonales que las tribus nómadas formaron al deambular por las regiones en busca de alimento, sin embargo cuando éstos grupos se volvieron sedentarios, los caminos pasaron a tener finalidades religiosas, comerciales y de conquista.

Hoy en día dichos caminos son catalogados según su función, tipo de terreno, admisión y técnica oficial; pero aún cuando se les llame de distinta manera (carretas, camino secundario, autopista, etc.), todos comparten una misma función conectando cada rincón del país.

Según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en 2007, la longitud de la red de vías terrestres fue de 356 000 km, de los cuales una tercera parte corresponde a brechas revestidas, poco más de diez mil kilómetros corresponde a carreteras de 4 carriles. Las carreteras en México se clasifican en federales, que están a cargo de la SCT, estatales, las cuales son construidas por los estados y ambas son gratuitas; y en autopistas de cuota las cuales son administradas por un consorcio llamado caminos y puentes federales ó por empresas concesionarias.

Independientemente de su clasificación, las carreteras forman una parte fundamental en la economía de nuestro país, debido a que son el principal sistema de transporte de todo tipo de mercancías y de personas, lo cual demanda que estas se encuentren en un óptimo estado para que el transitar por ellas sea agradable y confortable, sin mencionar que si están en óptimas condiciones ayudan a reducir los tiempos de traslado de mercancías y de personas.

En nuestro país la mayoría de las carreteras están construidas con pavimentos flexibles, es aquí donde reside la importancia de llevar a cabo un control de calidad de los materiales que se utilizan para construirlos y para darles mantenimiento.

La mayoría de las carreteras están construidas con mezclas en las que el asfalto es uno de los principales componentes, razón por la cual se hace necesario el estudio de sus propiedades mecánicas y dinámicas como elemento individual y como parte de la mezcla asfáltica.

A partir de las condiciones ambientales, el flujo vehicular, las cargas de los camiones, la temperatura, el material pétreo y la adherencia, entre otras variables, se selecciona el asfalto que se va a emplear en la mezcla para que tenga un comportamiento adecuado en la vía.

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

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

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

Por otro lado, los asfaltos empleados en pavimentos, normalmente son caracterizados con ensayos clásicos como la penetración, la viscosidad, punto de ablandamiento, ductilidad, densidad, etc., sin embargo, recientemente se emplean ensayos cada vez más sofisticados, como los ensayos de módulo complejo, deformación, envejecimiento, fatiga, energía disipada, etc., todo ello con objeto de seleccionar el asfalto adecuado para obtener una mezcla asfáltica con mejor comportamiento.

Las mezclas asfálticas en función de la temperatura ambiental pueden tener un comportamiento elástico lineal, no lineal o viscoso. A bajas temperaturas, el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la temperatura se va comportando como un material elástico no lineal, y aparece un comportamiento viscoso a medida que la temperatura continúa aumentando. Es así como en épocas de temperaturas bajas (invierno) no existen deformaciones plásticas, su resistencia aumenta y el comportamiento normalmente es elástico. A

temperaturas intermedias y elevadas, la cohesión de la mezcla disminuye por el cambio de estado del asfalto, y crea deformaciones permanentes y reducción de sus propiedades mecánicas y dinámicas.

La propiedad fundamental de las mezclas bituminosas para carreteras es su capacidad de deformarse sin romper al absorber esfuerzos relativamente elevados y repetidos; éste es el principio de funcionamiento de los pavimentos flexibles. La medida esencial para tal comportamiento es la resistencia al corte, con sus dos componentes: la fricción y la cohesión. El factor friccional se analiza generalizando los postulados de la mecánica de suelos al estudio de las mezclas asfálticas, puesto que los agregados conforman una estructura granular; en cambio, la cohesión debe evaluarse a partir de las propiedades reológicas del medio continuo presente en la mezcla, el sistema filler-asfalto (**mástico asfáltico**), que define su comportamiento ante las solicitaciones deformantes. Por tales razones, es más apropiado pensar en las cualidades que el mástico proporciona a la mezcla, en lugar de considerar aisladamente al ligante. La incorporación de filler a las mezclas permite mejorar las propiedades del medio continuo bituminoso: espesar el asfalto con el fin de modificar su fluir viscoso, mejorar la adherencia y proveer de un mayor espesor a la lámina que recubre los agregados, permitiendo retardar el envejecimiento.

En una mezcla asfáltica, la cantidad y naturaleza del filler a incorporar debería variar en función de las propiedades volumétricas y físico mecánicas que se pretendan obtener. El hecho de dosificar racionalmente el mástico sin exceder la (concentración crítica), permite prever la proporción máxima a adicionar sin sacrificar la resistencia a las deformaciones por sobrefillerización, ya que un exceso de la relación filler/asfalto traerá una elevada rigidez.

En mezclas muy expuestas a los factores climáticos, como las drenantes y otras con contenidos elevados de vacíos, la función del mástico sigue siendo trascendental, a pesar que ya no constituyen propiamente un medio continuo que llena a los huecos de la fase pétreo. En estas mezclas, el mástico otorga cohesión al conjunto, mejora la adhesividad agregado ligante y provee una lámina de mayor espesor alrededor del agregado que la que hubiese existido con asfalto sólo, disminuyendo los procesos de volatilización y oxidación. De hecho, además del empleo de asfaltos modificados y de agregados de buena calidad, la adición de un filler apropiado ha sido otra de las razones del avance tecnológico de las mezclas con granulometría discontinua, que ganaron confiabilidad con el transcurso de los años.

Pero más allá de los criterios esgrimidos para diseñar una determinada mezcla, su formulación debería llevar a obtener pavimentos con mejores prestaciones durante el mayor tiempo posible, para lo cual es de mucha importancia obtener pavimentos con mejores prestaciones durante el mayor tiempo posible, para lo cual es muy importante la optimización de su resistencia al envejecimiento. La realidad indica, sin embargo, que estos parámetros no han sido considerados convenientemente por los técnicos a la hora de diseñar las mezclas asfálticas.

Sin embargo la Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado distintas metodologías para el estudio de los ligantes asfálticos. En particular en lo que respecta al envejecimiento, la

acción del agua en las mezclas asfálticas y el efecto de las temperaturas, el Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL®), basado y fundamentado en el ensayo Cántabro de abrasión por desgaste, permite evaluar la respuesta funcional que diferentes tipos de másticos brindan a mezclas con características granulométricas preestablecidas, cuantificando las pérdidas por disgregación debido a la disminución de las propiedades cohesivas por causa del envejecimiento y de las condiciones térmicas extremas durante la aplicación de las cargas.

En este trabajo se pretende evaluar el comportamiento y beneficios que pueden obtenerse al adicionar distintos tipos de filler a las mezclas asfálticas a fin de aumentar su resistencia al envejecimiento, mediante metodologías y técnicas de estudio del comportamiento funcional de los ligantes asfálticos. La herramienta básica utilizada en este trabajo ha sido el Método Universal de Caracterización de Ligantes, UCL®, aplicado al estudio del sistema bifásico filler-asfalto (mástico asfáltico) con el objeto de observar la evolución de sus características al ser sometido a envejecimiento, a la humedad y a temperatura en el laboratorio.

Por todo lo anterior, se decidió realizar en el laboratorio de materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el estudio sobre el comportamiento del mástico asfáltico con diferentes tipos de filler al ser sometidos a condiciones de temperatura, humedad y envejecimiento. Y como se mencionó anteriormente el Método Universal de Caracterización de Ligantes es el elegido para llevar a cabo este análisis.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo de investigación es analizar el comportamiento del mástico asfáltico con diferentes tipos de filler, cuando es sometido a condiciones de temperatura, humedad y envejecimiento. Ejemplificando de manera sencilla y muy práctica los resultados que se obtengan utilizando el Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL®), el cual emplea el Ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste, y de esta manera comprender los efectos que le causan a los pavimentos.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- Definir los diferentes tipos de filler a emplear para llevar a cabo el análisis del comportamiento del mástico asfáltico, en la región de Morelia Michoacán, México.
- Preparación de los materiales necesarios para realizar el Método UCL®
 - ❖ Muestreo, obtención y preparación de los materiales pétreos necesarios para la elaboración de las probetas, es decir consideramos en este punto el acarreo del material, del banco al laboratorio de la facultad de Ing. Civil, el cribado, lavado y secado de los materiales pétreos (fracción gruesa y fina).
 - ❖ Obtención del asfalto procedente de la refinería de Salamanca tipo AC-20 necesario para la fabricación de las probetas a ensayar con el Método UCL®.
- La fabricación de probetas para el Método UCL®.

- Empleo del Método UCL®, y análisis del comportamiento que tiene el Mástico Asfáltico cuando se le incorporan diferentes tipos de filler de la región de Morelia y otros que son de aportación los cuales podemos encontrar en presentaciones comerciales (cemento, cal y agregado de piedra caliza). Los aspectos que se van analizar con este método son:

1) Efecto de la temperatura.

En este factor analizaremos el efecto que produce la variación de temperatura (calor) al mástico asfáltico y haremos una comparación de los efectos que se producen en el mástico a una misma temperatura pero con filler diferente.

2) Efecto del agua.

Estudiaremos el efecto que el agua va a tener en los diferentes másticos que se van a fabricar con el mismo tipo de asfalto pero adicionándole diferentes tipos de filler.

3) Efecto del envejecimiento.

Analizaremos el comportamiento de los diferentes tipos de mástico asfáltico que fabricaremos con la adición de diferentes tipos de filler al asfalto AC-20, cuando lo sometemos a una temperatura determinada por diferentes lapsos de tiempo, simulando de esta manera el efecto que el tiempo produce sobre los pavimentos flexibles.

CAPÍTULO 1

MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una mezcla asfáltica es el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material asfáltico en un pétreo. Las proporciones relativas del asfalto y los pétreos determinan las propiedades físicas de la mezcla.

La mezcla asfáltica debe ser duradera, es decir, debe ser resistente a las acciones tales como el despegue de la película de asfalto del agregado por efectos del agua, abrasión del tránsito, temperatura, a las sollicitaciones de tránsito a través de su estabilidad, etc. Una mezcla densa debe ser impermeable para que sus componentes no estén bajo la acción directa de los agentes atmosféricos y debe ser trabajable para su fácil colocación y compactación en terreno. Aunque en una mezcla asfáltica, el asfalto sea minoritario en proporción, sus propiedades pueden influir de manera significativa en su comportamiento. El tipo de mezcla será el que, en gran medida, determine la contribución hecha por el ligante sobre todo el conjunto.

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

Por otro lado, a bajas temperaturas de servicio el ligante se vuelve rígido y va perdiendo poder de resistencia a las tensiones, volviéndose frágil y se hace susceptible de

fisuraciones ó (fracturas). El grado de susceptibilidad a la fisuración está relacionado con la dureza del asfalto y su capacidad para absorber las sollicitaciones inducidas por el tráfico. Pero disminuyendo la dureza del asfalto, se minimizará el riesgo de falla por fragilidad (fatiga).

Es importante considerar dos aspectos importantes a la hora de elegir el asfalto adecuado para cada tipo de mezcla, para que esta nos dé un comportamiento satisfactorio una vez puesta en servicio, estos factores son: ahuellamiento a altas temperaturas y fisuración por fragilidad térmica a bajas temperaturas. Donde mejorando el comportamiento a altas temperaturas, se influye negativamente en el comportamiento a bajas temperaturas.

Estas mezclas asfálticas pueden ser fabricadas en planta y con los equipos apropiados para esta labor. Según sus propiedades y espesores de capa, se considera que aportan capacidad estructural al pavimento.

Las mezclas asfálticas, según el procedimiento de mezclado, se clasifican de acuerdo a la SCT como sigue:

- Mezclas asfálticas en caliente.
 - ❖ Mezclas asfálticas de granulometría densa.
 - ❖ Mezclas asfálticas de granulometría abierta.
 - ❖ Mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA.
- Mezclas asfálticas en frío.
 - ❖ Mezclas asfálticas de granulometría densa.
 - ❖ Mortero asfáltico.
- Mezclas asfálticas por el sistema de riegos.

1.1.-Mezclas asfálticas en caliente.

De acuerdo con la SCT, son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla. Se les llama en caliente porque su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) esto para que todas las partículas de los

agregados pétreos queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente.

Estas se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, son utilizadas tanto en capas de rodadura como para capas inferiores del pavimento.

1.1.1.- Mezclas asfálticas de granulometría densa.

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37.5mm (1 ½ in) y 9.5mm (3/8 in) con un % de vacíos entre 3 y 5%.

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

1.1.2.-Mezclas asfálticas de granulometría abierta.

Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre 12.5 mm (½ in) y 6.3 mm (¼ in).

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

1.1.3.-Mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA.

Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre 19mm (3/4 in) y 9.5mm (3/8 in). Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito. Cuando son usadas como capas de rodadura su finalidad principal es mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional. Al tener una elevada macrotextura se evita que el agua de lluvia forme una película

continúa sobre la superficie del pavimento, con lo que se incrementa la fricción de las llantas; se minimiza el acuaplaneo; se reduce la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes; y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura.

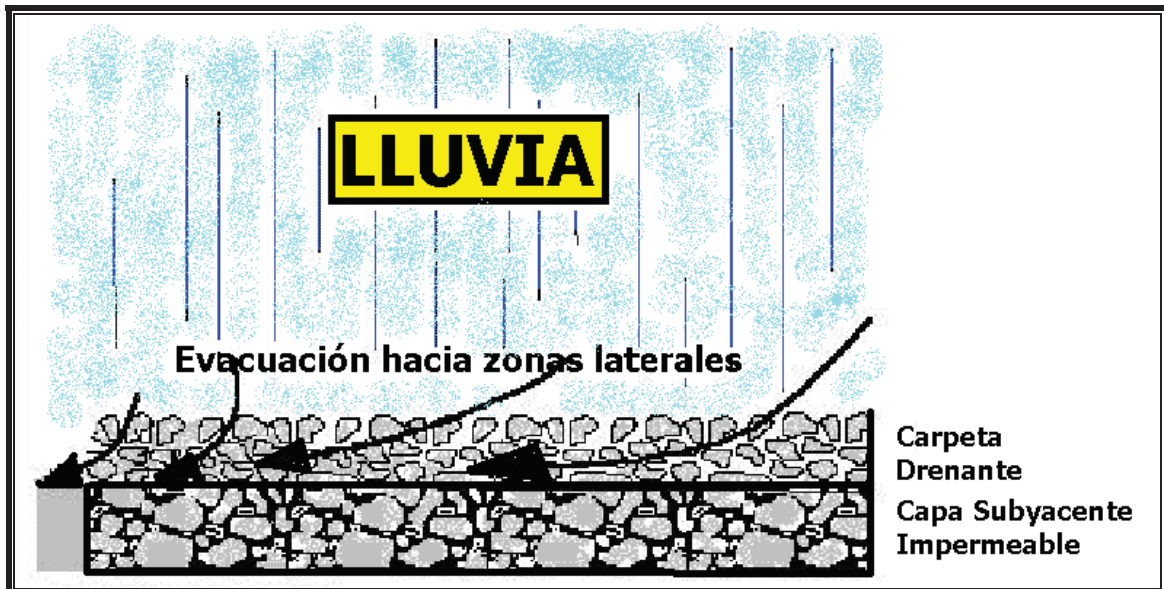


FIGURA 1 Carpeta asfáltica de granulometría abierta

1.2.-Mezclas asfálticas en frío.

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

1.2.1.- Mezclas asfálticas de granulometría densa

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

1.2.2.-Mortero Asfáltico.

Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de 2.36mm (No. 8). Normalmente se coloca sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura.

1.3.-Mezclas asfálticas por el sistema de riego.

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

CAPÍTULO 2

ASFALTO

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

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

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

Los depósitos naturales de asfalto suelen formarse en pozos o lagos a partir de residuos de petróleo que rezuman hacia la superficie a través de fisuras en la tierra. Entre ellos destacan el lago Asphaltites o mar Muerto, en Palestina; los pozos de alquitrán de La Brea, en Los Ángeles, en los cuales se han encontrado fósiles de flora y fauna prehistóricas; el lago de la Brea, en la isla de Trinidad, y el lago Bermúdez, en Venezuela. También se aprovechan los depósitos de rocas asfálticas o rocas impregnadas de asfalto.

Otro tipo de asfalto de importancia comercial es la gilsonita, que se encuentra en la cuenca del río Uinta, al suroeste de Estados Unidos, y se utiliza en la fabricación de pinturas y lacas.

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

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

El asfalto que es el derivado negro o castaño oscuro del petróleo, es diferente del alquitrán, que es el residuo de la destilación destructiva de la hulla. El asfalto consta de hidrocarburos y sus derivados y es completamente soluble en disulfuro de carbono (CS_2). Es el residuo del petróleo, después de extraer, por refinación o destilación, los componentes más volátiles. Se le conoce en México con el nombre popular de chapopote.

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

Los porcentajes de asfaltenos y maltenos presentes en el asfalto se pueden determinar en un disolvente dado y se deben definir en términos de ese disolvente a fin de que tengan sentido. Por ejemplo, en la tabla 1 se muestran los componentes fraccionales el asfalto después de diluirlo 100 veces con n-pentano.

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

2.1.-Origen del asfalto.

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

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

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

2.2.-Historia y los primeros usos del asfalto

Los Sumerios, 3800 A. C., usaron asfalto y se recuerda éste como el primer uso de este producto. En Mohenjo Daro, en el valle Indus, existen tanques de agua particularmente bien preservados los cuales datan del 3.800 AC. En las paredes de este tanque, no solamente los bloques de piedra fueron pegados con un asfalto "natural" sino que también el centro de las paredes tenía "nervios" de asfalto natural.

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

Los antiguos usos "naturales" del asfalto descritos arriba demuestran que estos asfaltos eran utilizados en aquellas partes habitadas del mundo donde estos depósitos de asfalto natural estaban fácilmente disponibles. En consecuencia esto parece haber sido

poco desarrollo del arte en algún otro sitio. No fue hasta el fin del siglo XIX que alguno de los presentes mayores usos del asfalto fueron introducidos. En la mitad del siglo XIX se intenta que el asfalto fuera manufacturado para utilizarse en superficies de carreteras el cual provenía de depósitos naturales europeos.

Así fue como se comenzaron a utilizar productos naturales que se obtenían del suelo disponibilidad, no obstante lo cual a mediados del mismo, la roca asfáltica participaba en la pavimentación de calles en Europa y después de 1870, en USA. El aporte intensivo del asfalto en obras viales ocurrió a principios del siglo XIX debido a dos acontecimientos casi simultáneos: la aparición del automotor con rodado neumático -que sustituyó a la llanta maciza de caucho ideada en 1869 y la explotación masiva del petróleo cuya industrialización lo convirtió en productor principal de asfaltos.

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

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

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

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

2.3.-Asfaltos Naturales.

Los asfaltos naturales, se han producido a partir del petróleo, pero por un proceso natural de evaporación de las fracciones volátiles, dejando las asfálticas solamente.

Estos pueden encontrarse como escurrimientos superficiales en depresiones terrestres, dando origen a lagos de asfalto, como los de las islas Trinidad y Bermudas.

También aparecen impregnando los poros de algunas rocas, denominándose rocas asfálticas, como la gilsonita. Así también se encuentran mezclados con elementos minerales, como pueden ser arenas y arcillas en cantidades variables, debiendo someterse a posteriores procesos de purificación, para luego poder ser utilizadas en pavimentación. En la actualidad, no es muy utilizado este tipo de asfalto por cuanto adolece de uniformidad y pureza.

Estos asfaltos pueden clasificarse como:

Asfaltos Nativos, sólidos o semisólidos

1) Puros o casi puros.

Asfalto del lago Bermúdez.

2) Asociados con materia mineral

Asfaltos del lago Trinidad.
Asfaltos de Iraq, Boeton y Selenitza.
Asfaltos de roca europeos y americanos.

3) Asfaltitas duras

Gilsonita, Grahamita, Pez lustrosa, Manjak

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

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

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

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

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

Los asfaltos de roca se usan para pavimentar calles. Se mezclan uno o varios asfaltos de roca pulverizados para obtener una composición media, se extiende la mezcla, se aplica calor si es necesario, y por medio de presión se iguala la superficie. La roca pulverizada se mezcla con asfalto del lago Trinidad u otros asfaltos para obtener un mástico que es mucho más rico en asfalto que las mezclas de rocas. Este mástico, aplicado a una base de concreto o de madera a una temperatura de 177 a 232 °C, se utiliza en la fabricación de materiales para tejados, pisos y revestimientos impermeabilizadores para estanques y depósitos. Una buena parte del mástico utilizado en Estados Unidos para hacer revestimientos o pisos impermeabilizados o resistentes a los ácidos no contiene asfalto nativo de roca, sino mezclas de otros asfaltos con polvo de piedra, rocas trituradas, arena o grava.

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

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

A diferencia de casi todos los demás asfaltos naturales o de petróleos, la gilsonita se mezcla en casi todas las proporciones con ceras para formar compuestos estables. Cuando se emplea en proporciones pequeñas en mezclas de cera-asfaltos, actúa como portador e impide la separación de la cera y el asfalto. Añadiendo una pequeña proporción de gilsonita al fundente antes de soplar el asfalto, el producto es menos

grasiento o aceitoso. Cuando se añade a un asfalto oxidado, de temperatura de reblandecimiento elevada, la gilsonita reduce la penetración y el punto de reblandecimiento; pero cuando se añade a un asfalto oxidado de temperatura de reblandecimiento baja, reduce la penetración y eleva el punto de reblandecimiento.

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

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

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

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

2.3.1.-Composición del Asfalto

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

Las primeras experiencias para describir su estructura, fueron desarrolladas por Nellensteyn en 1924, cuyo modelo fue mejorado más tarde por Pfeiffer y Saal en 1940, en base a limitados procedimientos analíticos disponibles en aquellos años.

El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micelar, el cual provee de una razonable explicación de dicha estructura, en el cual existen dos fases; una discontinua (aromática) formada por dos asfaltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfaltenos, denominada maltenos. Las resinas contenidas en los

maltenos son intermediarias en el asfalto, cumpliendo la misión de homogeneizar y compatibilizar a los de otra manera insoluble asfáltenos. Los maltenos y asfaltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites.

2.3.2.-Asfaltos Derivados de Petróleo

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

Petróleos crudos de base asfáltica.

Petróleos crudos de base parafínica.

Petróleos crudos de base mixta (contiene parafina y asfalto).

El asfalto procedente de ciertos crudos ricos en parafina no es apto para fines viales, por cuanto precipita a temperaturas bajas, formando una segunda fase discontinua, lo que da como resultado propiedades indeseables, tal como la pérdida de ductilidad. Con los crudos asfálticos esto no sucede, dada su composición. El petróleo crudo extraído de los pozos, es sometido a un proceso de destilación en el cual se separan las fracciones livianas como la nafta y keroseno de la base asfáltica mediante la vaporización, fraccionamiento y condensación de las mismas.

En consecuencia, el asfalto es obtenido como un producto residual del proceso anterior. El asfalto es además un material bituminoso pues contiene betún, el cual es un hidrocarburo soluble en bisulfuro de carbono. El alquitrán obtenido de la destilación destructiva de un carbón graso, también contiene betún, por lo tanto también es un material bituminoso pero no debe confundirse con el asfalto, ya que sus propiedades difieren considerablemente. El alquitrán tiene bajo contenido de betún, mientras que el asfalto está compuesto casi enteramente por betún, entre otros compuestos. El asfalto de petróleo moderno, tiene las mismas características de durabilidad que el asfalto natural, pero tiene la importante ventaja adicional de ser refinado hasta una condición uniforme, libre de materias orgánicas y minerales extraños.

2.3.3.-Obtención de Asfaltos en Refinerías:

El crudo de petróleo es una mezcla de distintos hidrocarburos que incluyen desde gases muy livianos como el metano hasta compuestos semisólidos muy complejos, los

componentes del asfalto. Para obtener éste deben separarse las distintas fracciones del crudo de petróleo por destilaciones que se realizan en las refinerías de petróleo.

- **Destilación Primaria:**

Es la primera operación a que se somete el crudo. Consiste en calentar el crudo en hornos tubulares hasta aproximadamente 375°C. Los componentes livianos (nafta, keroseno, gas oil), hierven a esta temperatura y se transforman en vapor. La mezcla de vapores y líquido caliente pasa a una columna fraccionadora.

El líquido o residuo de destilación primaria se junta en el fondo de la columna y de ahí se bombea a otras unidades de la refinería.

- **Destilación al Vacío:**

Para separar el fondo de la destilación primaria, otra fracción libre de asfaltenos y la otra con el concentrado de ellos, se recurre comúnmente a la destilación al vacío. Difiere de la destilación primaria, en que mediante equipos especiales se baja la presión (aumenta el vacío) en la columna fraccionadora, lográndose así que las fracciones pesadas hiervan a menor temperatura que aquella a la que hervían a la presión atmosférica. El producto del fondo de la columna, un residuo asfáltico más o menos duro a temperatura ambiente, se denomina residuo de vacío.

De acuerdo a la cantidad de vacío que se practica en la columna de destilación, se obtendrán distintos cortes de asfaltos que ya pueden ser utilizados como cementos asfálticos.

- **Desasfaltización con propano o butano:**

El residuo de vacío obtenido por destilación al vacío, contiene los asfaltenos dispersos en un aceite muy pesado, que, a la baja presión (alto vacío) y alta temperatura de la columna de vacío, no hierve (se destila). Una forma de separar el aceite de los asfaltenos es disolver (extraer) este aceite en gas licuado de petróleo. El proceso se denomina "desasfaltización" y el aceite muy pesado obtenido, aceite desasfaltizado. Se utiliza como solvente propano o butano líquido, a presión alta y temperaturas relativamente moderadas (70 a 120°C). El gas licuado extrae el aceite y queda un residuo semisólido llamado "asfalto".

- **Oxidación del Asfalto**

Es un proceso químico que altera la composición química del asfalto. El asfalto está constituido por una fina dispersión coloidal de asfaltenos y maltenos. Los maltenos actúan

como la fase continua que dispersa a los asfaltenos. Las propiedades físicas de los asfaltos obtenidos por destilación permiten a los mismos ser dúctiles, maleables y reológicamente aptos para su utilización como materias primas para elaborar productos para el mercado vial. Al "soplar" oxígeno sobre una masa de asfalto en caliente se produce una mayor cantidad de asfaltenos en detrimento de los maltenos, ocasionando así de esta manera una mayor fragilidad, mayor resistencia a las altas temperatura y una variación de las condiciones reológicas iniciales.

Los materiales asfálticos se emplean en la elaboración de carpetas, mezclas, morteros, riegos y estabilizaciones, ya sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados, para ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o subbases. También se pueden usar para construir, fabricar o impermeabilizar otras estructuras, tales como algunas obras complementarias de drenaje, entre otras.

Los materiales asfálticos para pavimentación se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, como se indica en la siguiente tabla.

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

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

2.4.-Cementos asfálticos.

Los cementos asfálticos son los que se obtienen del proceso de la destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

Según su viscosidad dinámica a 60° C, los cementos asfálticos se clasifican como se indica en la Tabla 4. Donde se señalan los usos más comunes de cada uno.

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

Clasificación	Viscosidad a 60° C Pa· S (P ¹)	Usos más comunes
AC-5	50 ± 10 (500±100)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la figura 2. - 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 mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 2. - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la figura 2.
AC-20	200 ± 40 (2000±400)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 en la Figura 2. - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 2.
AC-30	300 ± 60 (3000±600)	- En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 4 en la Figura 2. - En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 3 y 4 en la figura 2. - En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos de impregnación.

[1] Poises

2.4.1.- Requisitos de calidad para cementos asfálticos.

Los cementos asfálticos deberán de cumplir con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 3.



FIGURA 2 Regiones geográficas para la utilización de asfaltos clasificados según su viscosidad dinámica a 60°C ver tabla 4

Tabla 3 Requisitos de calidad para cemento asfáltico clasificado por su viscosidad dinámica a 60°C

Características	Clasificación			
Del cemento asfáltico original:	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s [$P^{(1)}$]	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1000 ± 200)	200 ± 40 (2000 ± 400)	300 ± 60 (3000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1mm ² /s = centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybold-Furol a 135°C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25°C, 100g, 5 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad; %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento; °C	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°C; Pa·s [$P^{(1)}$], máximo	200 (2000)	400 (4000)	800 (8000)	1200 (12000)
Ductilidad a 25°C y 5 cm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25 °C; %, mínimo	46	50	54	58

$P^{(1)}$ Poises

2.5.-Emulsiones asfálticas.

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

2.5.1.- Tipos de emulsiones asfálticas.

- De rompimiento rápido, que generalmente se utilizan para riegos de liga y carpetas por el sistema de riegos, a excepción de la emulsión ECR-60, que no se utilizará en la elaboración de éstas últimas
- De rompimiento medio, que normalmente se emplean para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta, especialmente cuando el contenido de finos en la mezcla es igual que 2% o menor, así como en trabajos de conservación tales como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.
- De rompimiento lento, que comúnmente se utilizan para carpetas de mezcla en frío elaboradas en planta y para estabilizaciones asfálticas
- Para impregnación, que particularmente se utilizan para impregnaciones de subbases y/o bases hidráulicas.
- Superestables, que principalmente se emplean en estabilizaciones de materiales y en trabajos de recuperación de pavimentos.
- Según su contenido de cemento asfáltico en masa, su tipo y polaridad, las emulsiones asfálticas se clasifican como se indica en la tabla 4.

2.5.2.- Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas.

Las emulsiones asfálticas cumplirán con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

- Para las emulsiones asfálticas aniónicas, según su clasificación, han de cumplir con todos los requisitos establecidos en la tabla 5.
- Para emulsión asfálticas catiónicas, según su clasificación, deberán cumplir con todos los requisitos establecidos en la tabla 6 que se muestra a continuación.

Tabla 4 Clasificación de las emulsiones asfálticas

Clasificación	Contenido de cemento asfáltico en masa %	Tipo	Polaridad
EAR-55	55	Rompimiento rápido	Aniónica
EAR-60	60		
EAM-60	60	Rompimiento medio	
EAM-65	65		
EAL-55	55	Rompimiento lento	
EAL-60	60		
EAI-60	60	Para impregnación	
ECR-60	60	Rompimiento rápido	Catiónica
ECR-65	65		
ECR-70	70		
ECM-65	65	Rompimiento medio	
ECL-65	65	Rompimiento lento	
ECI-60	60	Para impregnación	
ECS-60	60	Sobrestabilizada	

Tabla 5 Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas aniónicas.

Características	Clasificación						
	EAR-55	EAR-60	EAM-60	EAM-65	EAL-55	EAL-60	EAI-60
De la emulsión							
Contenido de cemento asfáltico en masa; % mínimo	55	60	60	65	55	60	60
Viscosidad Saybolt-Furol a 25°C; s, mínimo	5	—	—	—	20	20	5
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C; s, mínimo	—	40	50	25	—	—	—
Asentamiento en 5 días; diferencia en % máximo	5	5	5	5	5	5	5
Retenido en malla No. 20 en la prueba del tamiz; %, máximo	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pasa malla No. 20 y se retiene en malla No. 60 en la prueba del tamiz; %, máximo	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Cubrimiento del agregado seco; %, mínimo	—	—	90	90	90	90	—
Cubrimiento del agregado húmedo; %, mínimo	—	—	75	75	75	75	—
Miscibilidad con cemento Portland; %, máximo	—	—	—	—	2	2	—
Carga eléctrica de las partículas	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
Demulsibilidad; %	60 mín.	50 mín.	30 máx.	30 máx.	—	—	—
Del residuo de la destilación:							
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s [P ⁽¹⁾]	50 ±10 (500 ± 100)	100 ±20 (1000 ± 200)	50 ±10 (500 ± 100)	100 ±20 (1000 ± 200)	50 ±10 (500 ± 100)	100 ±20 (1000 ± 200)	50 ±10 (500 ± 100)
Penetración a 25°C, en 100g y 5 s; 10 ⁻¹ mm	100 - 200	50 - 90	100 -200	50 - 90	100 -200	50 - 90	150 -250
Solubilidad; %, mínimo	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5
Ductilidad a 25°C; cm, mínimo	40	40	40	40	40	40	40

[1]Poises

Tabla 6 Requisitos de calidad para emulsiones asfálticas catiónicas

Características	Clasificación						
	ECR-60	ECR-65	ECR-70	ECM-65	ECL-65	ECI-60	ECS-60
De la emulsión							
Contenido de cemento asfáltico en masa; % mínimo	60	65	68	65	65	60	60
Viscosidad Saybolt-Furol a 25°C; s, mínimo					25	5	25
Viscosidad Saybolt-Furol a 50°C; s, mínimo	5	40	50	25			
Asentamiento en 5 días; diferencia en % máximo	5	5	5	5	5	10	5
Retenido en malla No. 20 en la prueba del tamiz; %, máximo	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pasa malla No. 20 y se retiene en malla No. 60 en la prueba del tamiz; %, máximo	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Cubrimiento del agregado seco; %, mínimo				90	90		90
Cubrimiento del agregado húmedo; %, mínimo				75	75		75
Carga eléctrica de las partículas	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Disolvente en volúmen; %, máximo		3	3	5		15	
Índice de ruptura; %	<100	<100	<100	80 - 140	>120		>120
Del residuo de la destilación:							
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s [P ⁽¹⁾]	50 ±10 (500 ± 100)	50 ±10 (500 ± 100)	50 ±10 (500 ± 100)	50 ±10 (500 ± 100)	50 ±10 (500 ± 100)	50 ±10 (500 ± 100)	50 ±10 (500 ± 100)
Penetración ⁽²⁾ a 25°C, en 100g y 5 s; 10 ⁻¹ mm	110 - 250	110 - 250	110 - 250	100 - 250	100 - 250	100 - 400	100 - 250
Solubilidad; %, mínimo	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	
Ductilidad a 25°C; cm, mínimo	40	40	40	40	40	40	

[1] Poises

[2] En climas que alcancen temperaturas iguales o mayores de 40°C, la penetración en el residuo de la destilación de las emulsiones ECR-65, ECR-70, ECM-65, ECL-65 y ECS-60, en el proyecto se puede considerar de 50 a 90X10⁻¹mm

2.6.-Asfaltos rebajados.

Los asfaltos rebajados, que regularmente se utilizan para la elaboración de carpetas de mezcla en frío, así como en impregnaciones de bases y subbases hidráulicas, son los materiales asfálticos líquidos compuestos por cemento asfáltico y un solvente, clasificados según su velocidad de fraguado como se indica en la tabla 7.

Tabla 7 Clasificación de los asfaltos rebajados

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

2.6.1.- Requisitos de calidad para asfaltos rebajados.

Los asfaltos rebajados, según su clasificación, cumplirán los requisitos establecidos en la tabla 8.

Tabla 8 Requisitos de calidad para asfaltos rebajados

Características	Grado	
	FM-1	FR-3
Del asfalto rebajado:		
Punto de inflamación Tag; °C, mínimo	38	27
Viscosidad Saybolt.Furol a 50°C; s	75 - 150	
Viscosidad Saybolt.Furol a 60°C; s		250 - 500
Contenido de solvente por destilación a 360°C, en volumen, %, máximo		
Hasta 225°C	20 máx.	25 mín.
Hasta 260°C	25 - 65	55 mín.
Hasta 315°C	70 - 90	83 mín.
Contenido de cemento asfáltico por destilación a 360°C, en volumen, % mínimo.	60	73
Contenido de agua por destilación a 360°C, en volumen, % máximo.	0.2	0.2
Del residuo de la destilación		
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s [P ⁽¹⁾]. Máximo	200 ±40 (2000 ± 400)	200 ±40 (2000 ± 400)
Penetración a 25°C, en 100g y 5 s; 10 ⁻¹ mm	120 - 300	80 - 120
Ductilidad a 25°C; cm, mínimo	100	100
Solubilidad; %, mínimo	99.5	99.5

[1] Poisesi

2.8.-Materiales asfálticos modificados.

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

2.8.1.-Polímero tipo I

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto a altas como a bajas temperaturas. Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno entre otras. Se utiliza en mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

2.8.2.-Polímeros tipo II

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

2.8.3.- Polímeros tipo III

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo plastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de

alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

2.8.4.- Hule molido de neumáticos

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

2.9.-Cementos asfálticos Grado (PG)

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

2.9.1.- Grado de desempeño (PG)

El grado de desempeño o grado PG es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El Grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico 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.

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

Los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el país, sin embargo, para fines prácticos, es recomendable seleccionar un cemento asfáltico que corresponde a uno de los 3 grados PG que se indican en la figura 3, de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pretenda utilizar, de entre las

zonas en que se ha dividido la República Mexicana que se muestra en la misma figura, pero considerando que dentro de una misma zona, las condiciones del clima en un área determinada pueden variar, lo que se debe tomar en cuenta para elegir el grado PG adecuado.

La temperatura máxima del Grado PG seleccionando según el clima, se ajusta de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante un periodo de servicio el pavimento de 10 años (ΣL_{10}) y de acuerdo con la velocidad de operación, como se indica en la tabla 9.



FIGURA 3 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos Grado PG

Tabla 9 Ajustes del Grado PG seleccionado por clima de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada y con la velocidad de operación

Intensidad del tránsito (ΣL_{10}) ⁽¹⁾	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (Entre 10 y 30 Km/h)	Ajuste por tránsito detenido (cruceos)
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L_{10} > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

[1] ΣL_{10} = Número de ejes equivalentes de 8.2 ton. (ESAL), esperado durante un periodo de servicio del pavimento de 10 años.

CAPÍTULO 3

AGREGADOS PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1.- Definición de agregados pétreos.

Los agregados pétreos son los materiales naturales seleccionados o sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado, que aglutinados con un material asfáltico se emplean en la elaboración de mezclas asfálticas.

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, calces, etc.) o con ligantes asfálticos.

3.2.- Tipos de agregados pétreos.

El tipo de agregado pétreo se puede determinar, de acuerdo a la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, se pueden clasificar en los siguientes tipos:

a) Agregados naturales.

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

b) Agregados de Trituración.

Son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera ó de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales canterables cuyas propiedades físicas sean adecuadas.

c) Agregados Artificiales.

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

d) Agregados Marginales.

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

3.3.- Propiedades de los agregados pétreos.

Las propiedades de los agregados se pueden definir bajo dos puntos de vista:

- Como elementos aislados, o individuales.
- Como conjunto

3.3.1.- Propiedades individuales.

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

3.3.2.- Propiedades de conjunto.

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

3.4.- Naturaleza petrológica de los agregados pétreos.

Desde un punto de vista práctico, los agregados se pueden clasificar en 3 grandes grupos:

- 1) Agregados calizos.
- 2) Agregados silíceos.
- 3) Agregados ígneos y metamórficos.

3.4.1.- Agregados Calizos.

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

3.4.2.- Agregados Silíceos.

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

3.4.3.- Agregados Ígneos y Metamórficos.

Son materiales que por sus características resultan muy adecuados para utilizarlos como agregado grueso en las capas de rodadura. Pueden incluirse en este grupo los basaltos, gabros, pórfidos, granitos, cuarcitas, etc. Sus cualidades para resistir al pulimento los hacen idóneos para garantizar la textura superficial necesaria en un periodo de tiempo, incluso con tráficos muy intensos. En este grupo tan amplio, los agregados de naturaleza más ácida pueden presentar una deficiente adhesividad con los ligantes asfálticos, pero en la mayoría de los casos el problema se puede resolver con activantes que son sustancias que tienen la misión específica de mejorar la adhesividad con los ligantes, o también el problema se resuelve empleando emulsiones adecuadas y en el caso de mezclas asfálticas, con el empleo de finos de naturaleza básica y un polvo mineral adecuado.

3.5.- Consideraciones acerca del empleo de los agregados pétreos.

Cuando se pretende hacer uso de los agregados pétreos para la construcción de pavimentos se deben considerar algunos aspectos fundamentales para su buen desempeño a la hora de formar parte en alguna de las capas del firme y principalmente en la elaboración de las mezclas asfálticas. Como son:

- **Naturaleza e identificación:**

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

- **Propiedades geométricas:**

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

- **Propiedades mecánicas:**

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

- **Ausencia de impurezas:**

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

- **Inalterabilidad:**

Es imprescindible la evaluación de las posibles degradaciones que puedan sufrir los agregados pétreos que se van a utilizar en una obra; así, los materiales evolutivos han de ser empleados con especiales precauciones para evitar comportamientos anómalos que puedan afectar la vida útil de las capas.

- **Adhesividad:**

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

Según el tipo de mezclas en que se vayan a utilizar de acuerdo a la SCT, los materiales pétreos se clasifican como se indica a continuación en:

- Materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa.
- Materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría abierta.
- Materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA.
- Materiales pétreos para mortero asfáltico.
- Materiales pétreos para carpetas por el sistema de riegos.
- Materiales pétreos para mezclas para asfálticas para guarniciones.

3.6.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa.

El material pétreo que se utilice en la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría densa, en caliente o en frío, en función de su tamaño nominal y del tránsito esperado en términos de número de ejes equivalentes de (8.2 ton) acumulados durante la vida útil del pavimento (ΣL), cumplirá con lo que se indica a continuación.

- a) Cuando el tránsito esperado (ΣL) sea igual a 1 millón de ejes equivalentes o menor, el material pétreo, según su tamaño nominal, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 11 o bien las señaladas en la tabla 13, así como los requisitos de calidad que se indican en la tabla 10. Se hace notar que no podrán utilizarse materiales con granulometrías entre una u otra zona granulométrica.

Tabla 10 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$)

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles; %, máximo.	35
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	40
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Tabla 11 Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (únicamente para $\Sigma L \leq 10^6$)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo en (mm) ó (in)				
Abertura (mm)	Designación	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)
		porcentaje que pasa				
50	2"					100
37.5	1 1/2"				100	90 - 100
25	1"			100	90 - 100	76 - 90
19	3/4"		100	90 - 100	79 - 92	66 - 83
12.5	1/2"	100	90 - 100	76 - 89	64 - 81	53 - 74
9.5	3/8"	90 - 100	79 - 92	67 - 82	56 - 75	47 - 68
6.3	1/4"	76 - 89	66 - 81	56 - 71	47 - 65	39 - 59
4.75	No.4	68 - 82	59 - 74	50 - 64	42 - 58	35 - 53
2	No.10	48 - 64	41 - 55	36 - 46	30 - 42	26 - 38
0.85	No.20	33 - 49	28 - 42	25 - 35	21 - 31	19 - 28
0.425	No.40	23 - 37	20 - 32	18 - 27	15 - 24	13 - 21
0.25	No.60	17 - 29	15 - 25	13 - 21	11 - 19	9 - 16
0.15	No.100	12 - 21	11 - 18	9 - 16	8 - 14	6 - 12
0.075	No.200	7 - 10	6 - 9	5 - 8	4 - 7	3 - 6

- b) Si el tránsito esperado (ΣL) es mayor de 1 millón de ejes equivalentes, el material pétreo cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 13 y con los requisitos de calidad que se indican en la tabla 12.

Tabla 12 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL)

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles; %, máximo.	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Tabla 13 Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo en (mm) ó (in)				
Abertura (mm)	Designación	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)
Porcentaje que pasa						
50	2"					100
37.5	1 1/2"				100	90 - 100
25	1"			100	90 - 100	74 - 90
19	3/4"		100	90 - 100	79 - 90	62 - 79
12.5	1/2"	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9.5	3/8"	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
6.3	1/4"	70 - 81	56 - 69	44 - 57	36 - 46	30 - 39
4.75	No.4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 34
2	No.10	28 - 42	25 - 35	20 - 29	17 - 24	13 - 21
0.85	No.20	18 - 27	15 - 22	12 - 19	9 - 16	6 - 13
0.425	No.40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0.25	No.60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0.15	No.100	6 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0.075	No.200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

3.7.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría abierta.

El material pétreo que se emplee en la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría abierta, generalmente en caliente, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 14 en función del espesor de la carpeta, así como los requisitos de calidad que se indican en la tabla 15.

Tabla 14 Requisitos granulométricos del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría abierta

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	Para espesores ≤ 4 cm	Para espesores > 4 cm
25	1"		100
19	3/4"	100	6 - 100
12.5	1/2"	65 - 100	45 - 70
9.5	3/8"	48 - 72	33 - 58
6.3	1/4"	30 - 52	22 - 43
4.75	No.4	18 - 38	14 - 33
2	No.10	5 - 19	5 - 19
0.075	No. 200	2 - 4	2 - 4

Tabla 15 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría abierta

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles; %, máximo.	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	25
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

[1] El material debe ser 100% producto de trituración de roca sana.

3.8.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA.

El material pétreo que se emplee en la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA, en caliente, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la tabla 16, en función de su tamaño nominal, así como los requisitos de calidad que se indican en la tabla 17.

Tabla 16 Requisitos granulométricos del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA

Malla		Tamaño nominal del material pétreo en (mm) ó (in)		
Abertura (mm)	Designación	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)
Porcentaje que pasa (en volumen)				
25	1"			100
19	3/4"		100	90 - 100
12.5	1/2"	100	90 - 100	50 - 88
9.5	3/8"	70 - 100	50 - 80	25 - 60
6.3	1/4"	43 - 68	29 - 50	20 - 38
4.75	No.4	30 - 50	20 - 35	18 - 28
2	No.10	19 - 27	15 - 23	15 - 23
0.85	No.20	16 - 20	13 - 20	13 - 20
0.075	No.200	8 - 12	8 - 11	8 - 11

Tabla 17 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría discontinua, Tipo SMA

Características		Valor
Desgaste de los Ángeles; %, máximo.		25
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo		25
Intemperismo acelerado, % máximo	en sulfato de sodio	15
	en sulfato de magnesio	20
Partículas trituradas, %, mínimo	una cara	100
	dos o más caras	90
Absorción, %, máximo		2
Desprendimiento por fricción (método B), %, máximo		10
ARENA Y FINOS		
Equivalente de arena; %, mínimo		55
Índice plástico, %, máximo		No plástico
Azul de metileno, mg/g, máximo		12

3.9.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para morteros asfálticos.

El material pétreo que se utilice en la elaboración de morteros asfálticos, generalmente con mezcla en frío, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 18 y con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 19.

Tabla 18 Requisitos de granulometría del material pétreo para morteros asfálticos

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura (mm)	Designación	
4.75	No.4	100
2	No.10	89 - 100
0.85	No.20	43 - 72
0.425	No.40	26 - 53
0.25	No.60	17 - 41
0.15	No.100	10 - 30
0.075	No.200	5 - 15

Tabla 19 Requisitos de calidad del material pétreo para morteros asfálticos

Características	Valor
Desgaste por abrasión en húmedo; %, máximo	10
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

3.10.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para carpetas por el sistema de riegos.

El material pétreo que se utilice en la elaboración de carpetas construidas por el sistema de riegos, según su denominación, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 20, así como con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 21.

Tabla 20 Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas por el sistema de riegos.

Malla		Denominación del material pétreo				
Abertura (mm)	Designación	1	2	3 - A	3- B	3 - E
Porcentaje que pasa						
31.5	1 ¼"	100	-----	-----	-----	-----
25	1"	95 mín.	-----	-----	-----	-----
19	¾"	-----	100	-----	-----	-----
12.5	½"	5 máx.	95 mín.	100	-----	100
9.5	⅜"	-----	-----	95 mín.	100	95 mín.
6.3	¼"	0	5 máx.	-----	95 mín.	-----
4.75	No.4	-----	-----	-----	-----	5 máx.
2	No.10	-----	0	5 máx.	5 máx.	0
0.425	No.40	-----	-----	0	0	-----

Tabla 21 Requisitos de calidad del material pétreo para carpetas por el sistema de riegos

Características	Valor
Desgaste de los Ángeles; %, máximo.	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Intemperismo acelerado; %, máximo	12
Desprendimiento por fricción; %, máximo	25
Cubrimiento con asfalto (Método Inglés); %, mínimo	90

3.11.- Requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas para guarniciones.

El material pétreo que se utilice en la elaboración de mezclas asfálticas para guarniciones cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 22 y tendrá un equivalente de arena mínimo de 50%.

Tabla 22 Requisitos de granulometría del material pétreo que se utilice en mezclas asfálticas para guarniciones

Malla		Porcentaje que pasa
Abertura mm	Designación	
19	3/4"	100
12.5	1/2"	87 - 100
9.5	3/8"	79 - 100
6.3	1/4"	68 - 100
4.75	No.4	60 - 100
2	No.10	40 - 91
0.85	No.20	28 - 61
0.425	No.40	20 - 42
0.25	No.60	14 - 33
0.15	No.100	10 - 25
0.075	No.200	3 - 15

CAPÍTULO 4

FILLER

4.1.-Definición:

Según el Sistema de Clasificación de Suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #200 (0.075 mm) y que se obtiene por el tratamiento de los materiales de los que provienen. Y según la normativa Europea UNE-EN 933-2., se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz 0.063 mm.

En general los filleres son sustancias finamente divididas, las cuales son insolubles en asfalto pero que pueden ser dispersadas en el, como un medio de modificar sus propiedades mecánicas y consistencia.

El filler o polvo mineral de aportación es un producto comercial de naturaleza pulverulenta (cemento normalmente o cenizas volantes de central térmica) o un polvo en general calizo, especialmente preparado para utilizarlo en el mástico para mezclas asfálticas. Cuando se trata de un producto comercial, se garantiza perfectamente su control y se conocen sus propiedades tanto físicas como químicas y su futuro comportamiento en la mezcla. Cuando se utiliza el otro tipo de filler, (de recuperación), que es aquel que se obtiene de las plantas asfálticas, no se sabe exactamente cuáles son sus componentes y en ocasiones varía su composición con el tiempo y puede estar o no, dentro de las normativas, debido a que es un residuo.

4.2.-Características deseables o de mayor interés acerca del polvo mineral (filler).

Las características que más suelen interesar de un polvo mineral son:

- **Finura.**

Al ocupar parcialmente los espacios libres dejados por la estructura granular compactada y conformada por las partículas mayores, reduce el volumen de vacíos de la mezcla evitando un aumento pronunciado de la cantidad de ligante asfáltico. El polvo mineral consigue cumplir con su función rellenadora, dependiendo del volumen de vacíos existente una vez que se haya compactado la estructura granular y en función de la granulometría y de las partículas de mayor tamaño. La densidad aparente del polvo mineral en Tolueno es una medida relativa del grado de finura del polvo, cualidad muy importante para las características finales de las mezclas. La densidad aparente del polvo mineral, en algunas normas aparece comprendida entre cinco y ocho decigramos por centímetro cúbico (0,5 a 0,8 g/cm³).

- **Modificación del comportamiento reológico.**

El empleo del polvo mineral, incrementa la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, sin modificar la naturaleza viscosa del ligante, originando como consecuencia un aumento de la resistencia al corte de las mezclas asfálticas.

- **Acción estabilizante frente al agua.**

Se incrementa la durabilidad de las mezclas asfálticas frente a la acción del agua debido a que se reduce parcialmente la porosidad de la estructura granular evitando el acceso del agua al interior, y por otro lado debido a que algunos polvos minerales presentan una mayor afinidad con el ligante asfáltico, mejoran la resistencia a la acción de desplazamiento que ejerce el agua sobre el ligante asfáltico. Las características de finura y comportamiento reológico se hayan vinculadas al tamaño y forma de las partículas. La acción estabilizante frente al agua depende además del tamaño y forma de las partículas, de la composición química de los rellenos minerales. Las funciones del polvo mineral no pueden apartarse del contenido y consistencia del ligante asfáltico en la mezcla.

- **Procedencia del polvo mineral**

El polvo mineral podrá proceder de los agregados, separándose de ellos por medio de los ciclones de la central de fabricación, o aportarse a la mezcla por separado de aquéllos como un producto comercial o especialmente preparado. Las proporciones del polvo mineral de aportación a emplear en la mezcla deben cumplir lo que fijen las normas, debido a que es un material que se

debe utilizar en proporciones adecuadas en cada tipo de mezcla y condiciones, para obtener un resultado óptimo.

El polvo mineral que quede inevitablemente adherido a los agregados tras su paso por el secador de la planta de asfalto en ningún caso podrá rebasar ciertos límites que algunas normas contienen, este valor está aproximadamente dentro del dos por ciento (2%) de la masa de la mezcla. Si se asegurase que el polvo mineral procedente de los agregados cumple las condiciones exigidas al de aportación, se podrá rebajar la proporción mínima de éste.

4.3.- Propiedades del polvo mineral como componente de las mezclas asfálticas.

En la interface filler-asfalto y en el comportamiento de la mezcla asfáltica, tienen que ver las propiedades físicas y químicas tanto como las características geométricas, propiedades de superficie, adsorción, adhesión, etc.

La irregularidad geométrica (forma, angulosidad y textura de superficie), es uno de los aspectos más importantes en el papel del filler dentro de la mezcla. La irregularidad geométrica afecta directamente el contenido óptimo de asfalto en la mezcla, a las características de interface del mástico y a su comportamiento reológico. Todos estos aspectos influyen directamente en el comportamiento estructural y mecánico de las mezclas.

La irregularidad geométrica se puede evaluar cualitativamente y cuantitativamente mediante el microscopio electrónico, y caracterizar la forma, angulosidad, textura superficial y la porosidad accesible de las partículas. Para la caracterización físico-química del filler y su influencia en el comportamiento y durabilidad de las mezclas asfálticas, el factor más significativo es la intensidad de adsorción. En los sistemas filler-asfalto, existe adsorción entre un sólido y una fase viscosa, los factores que influyen más en el mecanismo de adsorción son la composición del asfalto y las propiedades del filler, es decir, su composición mineralógica, sus características estructurales, la textura superficial y la superficie específica, el tipo de adsorción depende del tipo de filler principalmente, todos los procesos de adsorción son exotérmicos y la cantidad de calor liberado depende del carácter de la interacción entre los átomos y moléculas adsorbidos y de la superficie del sólido.

El efecto que se logra en un pavimento a partir de la utilización de un filler activo en la dosificación de la mezcla asfáltica, es que aumenta considerablemente su durabilidad. Existen filleres activos como cal hidratada y dolomítica que suelen mantener su resistencia en periodos de tiempo largos de tiempo en condiciones de contenido

óptimo de asfalto, mientras que los filleres no activos como basaltos y areniscas suelen deteriorarse rápidamente, también bajo condiciones de contenido óptimo de asfalto.

El contenido de asfalto tiene sus repercusiones en la durabilidad de una mezcla, se sabe que un incremento en el contenido de asfalto tiene un efecto favorable significativo en la durabilidad de los pavimentos, este efecto se debe principalmente, a que las capas de asfalto que recubren los agregados son más gruesas y a la reducción en el volumen de huecos, que hace disminuir la penetración del agua a las capas. La mejora en la durabilidad con el incremento de contenido de asfalto no es uniforme debido a que depende del tipo de filler involucrado en la mezcla.

Las propiedades de los filleres tienen un efecto muy importante en la durabilidad potencial de las mezclas asfálticas, el efecto del filler suele manifestarse, si es activo suele mantener resistencia por más tiempo que si no es activo.

La durabilidad potencial de la mezcla asfáltica suele mejorar con un incremento en el contenido de asfalto por encima del óptimo básico, es decir las condiciones óptimas de durabilidad se obtienen para contenidos de asfalto superiores al óptimo convencional, en este caso las muestras con filleres no activos resultan ser más sensibles al contenido de asfalto que en aquellas que contienen filleres activos.

4.4.- Ensayos para caracterizar el filler (polvo mineral).

- Emulsibilidad.

Es una medida de la afinidad del filler hacia los ligantes asfálticos, para verificar que no sean desplazados por el agua. El método de ensayo permite cuantificar esta propiedad mediante el concepto denominado coeficiente de emulsibilidad, que se define en las condiciones de ensayo, como la máxima cantidad de ligante asfáltico que se puede dispersar en forma de emulsión directa (ligante en agua) en un gramo de polvo mineral, sin que se produzca la inversión de la emulsión (agua en ligante). Una proporción mayor de ligante lleva a la coagulación de éste, como consecuencia de la referida inversión, separándose, entonces, en agua del sistema.

- Densidad aparente en tolueno.

Da una idea de la finura del filler que debe limitarse para evitar problemas en la envuelta con el ligante. El método consiste en medir el volumen ocupado por una cantidad especificada de la muestra de polvo mineral, cuando se sedimenta el tolueno. La densidad aparente determinada en estas condiciones, es una medida relativa del grado de finura del polvo mineral. Valores de la densidad aparente en tolueno entre 0.5 y 0.8

gr/cm³ corresponden a una actividad media adecuada para su utilización en mezclas asfálticas.

4.5.- Mezcla de asfalto y filler.

El efecto general de la adición de filleres es endurecer el asfalto. En términos prácticos significa que existirá una reducción en su deformación o fluencia producida, por una carga, un incremento en su punto de ablandamiento, una reducción de su penetración y un incremento en el stiffness. La propiedad de endurecimiento o stiffness depende de la cantidad de filler agregado o del tamaño de la partícula así como de la forma de la misma. Filleres tales como polvo de tiza producen un efecto menor.

Muchas de las capas de pavimento flexible que sirven como capa de rodadura fallan por problemas asociados al daño por envejecimiento, por cambios de temperatura y por el efecto del agua, antes que por las solicitaciones impuestas por el tráfico. Frente a esta problemática se han intentado soluciones en el diseño que consiste 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 asfalto deriva en exudaciones y escurrimientos, además de encarecerse el producto final.

Pero lo usual es que las especificaciones técnicas para obras de pavimentación asfáltica no consideren convenientemente los factores mencionados anteriormente al establecer sus prescripciones, insistiendo en caracterizar el comportamiento de los ligantes frente a los mecanismos responsables del desgaste de los materiales por efecto de las condiciones a que está sometido el pavimento asfáltico, 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 filleres 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-asfalto y que influyen sobre una serie de características fundamentales de las mezclas.

El envejecimiento, la susceptibilidad a la humedad y la susceptibilidad térmica son los factores principales 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 de seguridad como el perjuicio económico que significa realizar tareas frecuentes de mantenimiento y rehabilitación.

Estos fenómenos han sido objeto de numerosos estudios, sin embargo, la mayoría de los análisis se han realizado directamente sobre los ligantes de forma aislada, evaluándose los factores de envejecimiento, humedad y térmico, mediante la caracterización de los mismos a partir de ensayos que tratan de simular en forma acelerada algunos mecanismos que influyen en este proceso de deterioro, como la volatilización de las fracciones livianas y la oxidación. Estos métodos no permiten predecir cabalmente el comportamiento del material durante su etapa en servicio, pues la interacción agregado-ligante y la influencia del relleno mineral y de otros eventuales aditivos, alteran significativamente las cualidades de la fase bituminosa en el conjunto.

En los últimos años han aparecido nuevas técnicas que tratan de reproducir cómo actúan y qué procesos de transformación sufre el asfalto cuando se degrada por envejecimiento, por acción de la humedad o por acción de los cambios de temperatura, en las mezclas asfálticas; tales metodologías contemplan no sólo las características intrínsecas de los ligantes, sino también sus propiedades como parte integrante de un conjunto con los áridos y el filler. Y que permiten una evaluación de los ligantes en función de las propiedades que proporcionan a las mezclas. Uno de estos Métodos es el Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL®).

La propiedad fundamental de las mezclas asfálticas para carreteras es su capacidad de deformarse sin romperse al absorber esfuerzos relativamente elevados y repetidos, este es el principio de funcionamiento de los pavimentos flexibles.

La medida esencial para tal comportamiento es la resistencia al corte, con sus dos componentes: la fricción y la cohesión. El factor friccional se analiza generalizando los postulados de la mecánica de suelos al estudio de las mezclas asfálticas, puesto que los agregados conforman una estructura granular; en cambio la cohesión debe evaluarse a partir de las propiedades reológicas del medio continuo presente en la mezcla, el sistema filler-asfalto “mástico”, que define su comportamiento ante las sollicitaciones deformantes.

Por tales razones, es más apropiado pensar en las cualidades que el mástico proporciona a la mezcla, en lugar de considerar aisladamente al ligante. La incorporación de filleres a las mezclas, permite mejorar las propiedades del medio continuo bituminoso como: espesar el asfalto con el fin de modificar su fluir viscoso, mejorar la adherencia y proveer de un mayor espesor a la lámina que recubre a los agregados pétreos, permitiendo retardar los efectos que ocasionan en la mezcla asfáltica los efectos causados

por la variación de la temperatura, la humedad y la aplicación de la temperatura a través de diferentes lapsos de tiempo.

Es importante mencionar que en una mezcla asfáltica, la cantidad y naturaleza del filler a incorporar debería variar en función de las propiedades volumétricas y físico-mecánicas que se pretenden obtener. Debemos mencionar que es importante marcar la dosificación de filler a una mezcla asfáltica con el fin de no exceder un determinado grado de concentración en volumen del sistema filler-asfalto “concentración crítica”, este hecho de dosificar racionalmente el mástico permite prever la proporción máxima a adicionar sin sacrificar la resistencia a las deformaciones por sobrefillerización, ya que un exceso de la relación filler/asfalto traerá consigo una elevada rigidez.

En mezclas muy expuestas a los factores climáticos, como las drenantes y otras con contenidos elevados de vacíos, la función del mástico sigue siendo trascendental, a pesar que ya no constituye propiamente un medio continuo que llena los huecos de la fase pétreo. En estas mezclas el mástico otorga cohesión al conjunto, mejora la adhesividad agregado-ligante y provee una lámina de mayor espesor alrededor del agregado que la que hubiese existido con el asfalto sólo, disminuyendo los procesos de volatilización y oxidación. De hecho, además del empleo de asfaltos modificados y de agregados de buena calidad, la adición de un filler apropiado ha sido otra de las razones del avance tecnológico de las mezclas con granulometría discontinua, que ganaron confiabilidad con el transcurso de los años.

Pero más allá de los criterios esgrimidos para diseñar una determinada mezcla, su formulación debería llevar a obtener pavimentos con mejores prestaciones durante el mayor tiempo posible, para lo cual es de gran importancia la optimización de su resistencia al envejecimiento, la humedad y la temperatura. Hasta hace no mucho estos factores no habían sido considerados a la hora de diseñar una mezcla asfáltica, sin embargo, la Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado distintas metodologías para el estudio de los Ligantes asfálticos. En lo particular en lo que respecta al “factor de envejecimiento”, el método Universal de Ligantes (UCL®), basado y fundamentado en el ensayo Cántabro de abrasión por desgaste, permite evaluar la respuesta funcional que diferentes tipos de másticos brindan a mezclas con características granulométricas preestablecidas, cuantificando las pérdidas por disgregación debido a la disminución de las propiedades de cohesión por causa del envejecimiento y de las condiciones térmicas extremas durante la aplicación de las cargas.

En este trabajo se propone una evaluación de los beneficios y el comportamiento que pueden tener las mezclas asfálticas al adicionarle filler, a fin de aumentar su resistencia al envejecimiento, a la acción de la humedad y a la acción de la temperatura, mediante metodologías y técnicas de estudio del comportamiento funcional de los Ligantes asfálticos. Las variables analizadas han sido el tipo y la naturaleza del ligante y de filler y las proporciones relativas entre estos materiales. La herramienta básica utilizada en esta primera parte ha sido el Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL®), aplicado al estudio del sistema bifásico filler-asfalto “mástico” con el objeto de observar la evolución de sus características al ser sometido al envejecimiento en el laboratorio.

CAPÍTULO 5

MÉTODO UCL[®]

(MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES)

El Método Universal de Caracterización de Ligantes (Método UCL[®]), desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña por los Doctores **Félix Edmundo Pérez Jiménez y Jorge Rodrigo Miro Recasens**, está basado en la aplicación del ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste, es un procedimiento directo y sencillo que 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 evaluando la **susceptibilidad térmica**, la adherencia agregado-cemento asfáltico ante la acción del agua (**susceptibilidad a la humedad**), la resistencia al envejecimiento (**susceptibilidad al envejecimiento**), y el comportamiento del mástico asfáltico (asfalto – filler). Es una tecnología de fácil ejecución y que ofrece una novedosa herramienta para clasificar y cotejar los distintos asfaltos que podrían utilizarse en una determinada obra de pavimentación, pues permite diferenciar el comportamiento de ligantes, incluso aquellos que poseen propiedades similares según la caracterización

tradicional y además, manifestar las diferencias entre diversos asfaltos-polímero entre sí, y entre estos y los convencionales.

A este procedimiento se le dio el nombre de Universal por ser aplicable a cualquier asfalto. El principio del mismo es comparar directamente las respuestas de estos materiales como parte integrante de una mezcla asfáltica, exaltando sus diferencias relativas y las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Se evalúan cuatro propiedades funcionales que los ligantes han de aportar al comportamiento de las mezclas asfálticas: **Cohesión, susceptibilidad térmica, adhesividad y resistencia al envejecimiento, además de las características del mástico filler-asfalto.**

Pese a la importancia que tiene la cohesión proporcionada por el ligante a la mezcla, que puede considerarse tan básica y fundamental como la resistencia a compresión de un material hidráulico, no ha sido tenido en cuenta hasta ahora en la caracterización de los materiales asfálticos. 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 o corte y por impacto, péndulo, aunque es el Método UCL® el que más ventajas puede ofrecer, dada su sencillez, además de que permite evaluar el poder aglomerante del ligante sobre una mezcla patrón, tras el proceso de envuelta y adherencia a los agregados, y no la cohesión del producto en masa que puede ser muy diferente.

El Método UCL® para determinar la cohesión del ligante consiste en fabricar una mezcla patrón, compuesta por 1000g de agregado la cual va a contener el 80% de material de tamaño (5 a 2.5 mm) como material grueso y el 20% de tamaño (2.5 a 0.63 mm) y 45g de ligante a caracterizar, pero adicional a esto le debemos agregar filler a la mezcla para así poder evaluar el comportamiento que va tener el mástico asfáltico (filler –asfalto). Y con todo esto elaborar una probeta Marshall que se ensaya en la Máquina de desgaste de Los Ángeles sin carga abrasiva. Después de someterla a 300 revoluciones del tambor, se determinará su pérdida de peso, en %, referido al peso inicial de la probeta.

Como mencionamos anteriormente el objetivo del Método UCL® es valorar las propiedades fundamentales de los ligantes, a continuación se describen un poco más estas propiedades:

- **Cohesión.**

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

El Método UCL®, basado en el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste fue desarrollado como un procedimiento para valorar, la cohesión que el ligante proporciona a la mezcla.

- **Susceptibilidad térmica.**

Los ligantes bituminosos se caracterizan por tener un comportamiento frágil a bajas temperaturas, un comportamiento elasto-plástico a temperaturas medias y un comportamiento inconsistente a temperaturas altas como se muestra en la figura 4.

Esta variación del comportamiento del ligante con la temperatura puede ser evaluada y cuantificada mediante el empleo del Método UCL®. La determinación, en condiciones especiales, de las pérdidas por desgaste a distintas temperaturas, pone de manifiesto el comportamiento frágil del ligante, altas pérdidas al cántabro, su comportamiento elasto-plástico, pérdidas bajas al cántabro, y sus inconsistencias, fuerte incremento de las pérdidas.

Si graficamos las pérdidas obtenidas después del ensayo de las probetas en la Máquina de los Ángeles, obtenemos la curva de pérdidas al Cántabro-temperatura (curva de estado), con la cual podemos evaluar la susceptibilidad térmica de un ligante y comprobar su comportamiento, diferenciando el comportamiento de los asfaltos modificados.

- **Adhesividad agregado – ligante o susceptibilidad a la humedad.**

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

Mediante el Método UCL® se puede valorar la adhesividad agregado-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, está relacionado con la mejor o peor adhesividad del ligante con el agregado.

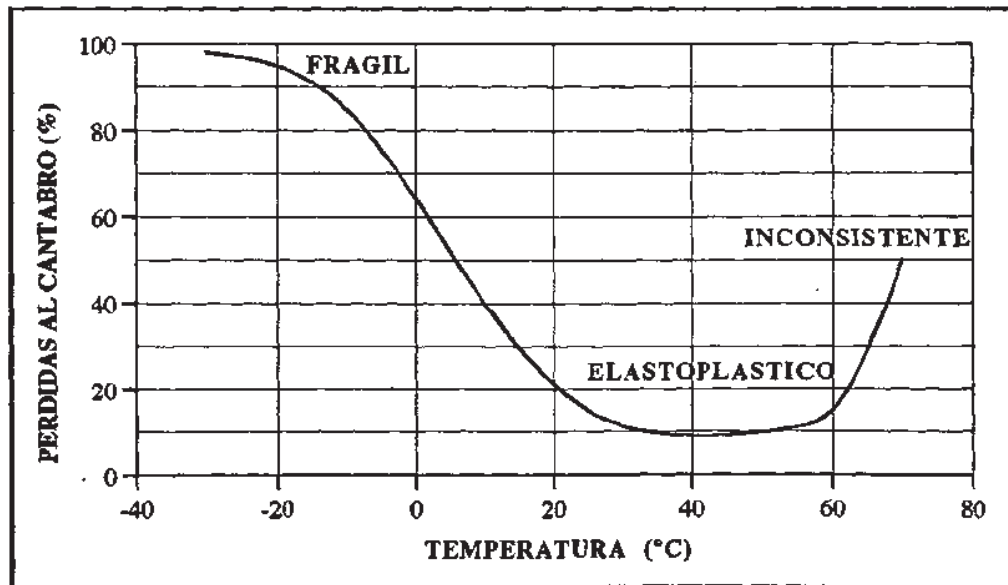


FIGURA 4 Influencia de la temperatura en el comportamiento de los ligantes bituminosos

- **Envejecimiento.**

La resistencia al envejecimiento de los ligantes asfálticos por la acción de los rayos ultravioletas y los agentes atmosféricos (aire, calor, agua, etc.), 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.

Este efecto de envejecimiento se puede simular y acelerar en el laboratorio y mediante el Método UCL® evaluar cómo va afectando a las características del ligante. Se obtiene así una curva de pérdidas al Cántabro-tiempo de envejecimiento, claramente relacionada con el endurecimiento del ligante.

- **Características del mástico filler-asfalto.**

El efecto del filler sobre el comportamiento del ligante puede ser también evaluado mediante el Método UCL®, determinando las pérdidas a distintas temperaturas para diferentes relaciones de filler/asfalto y poder así comprobar el efecto beneficioso que puede tener el empleo de diferentes tipos de filler especiales o incluso, la incorporación de fibras.

Mediante la determinación de las pérdidas en seco y tras inmersión, puede también determinarse el empleo de filleres hidrófilos cuya presencia produce la rápida desenvuelta de la mezcla en presencia de agua.

El Método UCL® consiste en introducir en la Máquina de los Ángeles, una probeta tipo Marshall fabricada con una granulometría especial (sin finos) al decir sin finos quiere decir que el material utilizado debe estar lavado, para lo cual será necesario utilizar una misma granulometría para la realización de todas las probetas, con un 80% de material pétreo comprendido entre las mallas No. 4 y entre la malla No. 8, y un 20% de material pétreo comprendido entre las mallas No. 8 y entre la malla No. 30 y un contenido de asfalto definido (4.5%) y someterla al ensayo sin colocar en la Máquina ninguna carga abrasiva (sin esferas).

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

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

Donde:

P_d = Pérdidas por desgaste (%).

P_i = Peso inicial (g)

P_f = Peso final (g)

Las vueltas en la Máquina de los Ángeles generan un deterioro en las probetas, es decir, como anteriormente mencionamos durante las 300 revoluciones a las que están sometidas cada una de las probetas ensayadas se van desprendiendo las partículas superficiales de las probetas debido al impacto y a la abrasión a que está siendo sometida la probeta, lo cual simula el efecto que hacen las cargas del tráfico en los pavimentos.



FIGURA 5 Máquina de los Ángeles



FIGURA 6 Máquina de los Ángeles con el contador de la Máquina compactadora Marshall

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

En este ensayo podemos observar y darnos una idea más clara sobre las características de la adhesividad y cohesión en las mezclas dado que, si las uniones son dúctiles y tenaces, las pérdidas por desgaste y abrasión en las probetas son bajas, y cuando resultan frágiles o poco consistentes, las pérdidas se incrementan.

En este trabajo se van a analizar tres factores que influyen en el comportamiento de las mezclas asfálticas y estos son: La temperatura, la humedad y el envejecimiento.

Una vez que las probetas han sido fabricadas las vamos a someter a 6 diferentes condiciones de temperatura las cuales son: -15, 5, 25, 40, 55 y 70°C como mencionamos a continuación.

5.1.- Análisis por temperatura o Susceptibilidad a la Humedad.

1. Las probetas serán introducidas al horno de ventilación forzada como el que se muestra a en la figura 7, durante un tiempo mínimo de 4 hr para que alcancen la temperatura deseada y homogénea en todas las pastillas.



FIGURA 7 Horno Eléctrico de ventilación forzada marca Humboldt

2. Una vez transcurridas las 4 hr y que las probetas han alcanzado la temperatura de ensayo deseada tomamos una del horno y la pesamos en la báscula analítica con aproximación a 0.1 g para obtener así el peso inicial (P_i) de la probeta. Procurando hacer la lectura del peso inicial de la probeta lo más rápido posible para evitar que la probeta pierda la temperatura.
3. Una vez que se obtuvo la lectura del (P_i) se introduce rápidamente la probeta a la Máquina de los Ángeles, se le coloca la tapa junto con los tornillos en la misma para asegurarla.
4. Después se somete la probeta a 300 revoluciones en la Máquina de los Ángeles, para esto se adaptó el contador del compactador Marshall a la Máquina de los Ángeles ya que una vez que se programa en el contador el número de revoluciones

se procede a verificar que se den efectivamente los 300 giros y así se evita tomar el tiempo con cronómetro y además se evitan errores.

5. Una vez que se han cumplido las 300 revoluciones, se procede a retirar la tapa de la Máquina de los Ángeles para sacar la fracción de probeta que ha quedado tras someterla a la prueba de desgaste, se pesa en la báscula analítica y obtenemos de esta manera el peso final (P_f).

5.2.- Análisis por efecto del agua (Susceptibilidad a la Humedad).

Para llevar a cabo el análisis de susceptibilidad a la humedad, debemos introducir las probetas a un Baño Marshall (Baño María) en una Máquina del mismo nombre como la que se muestra en la figura 8 durante un tiempo de 24 hrs, a una temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 2$. Una vez que las probetas se preparan se sigue el procedimiento que se describe a continuación.

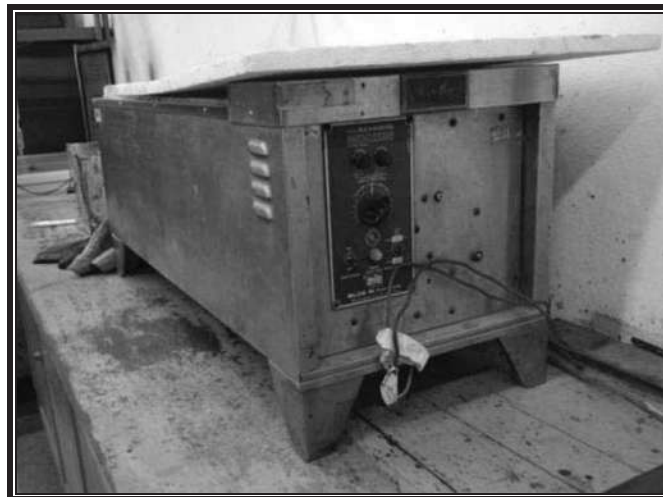


FIGURA 8 Máquina para Baño María ó Baño Marshall

Una vez que las probetas se han sacado del Baño María después de transcurridas las 24 h. Estas se sacan del mismo y se dejan secando otras 24 h para que se salga el exceso de agua y esto no afecte los resultados. El procedimiento para probarlas después del baño maría es el mismo que para la susceptibilidad a la temperatura.

- a) Las probetas a probar se introducen al horno eléctrico de ventilación forzada como el mostrado anteriormente en la figura 8 durante 4 h para que alcancen toda la temperatura de ensayo deseada.

- b) Una vez transcurridas las 4 h y que las probetas han alcanzado la temperatura de ensayo deseada se saca la probeta del horno y se pesa en la báscula analítica con aproximación a 0.1 g para obtener así el peso inicial (P_i) de la probeta. Procurando hacer la lectura del peso inicial de la probeta lo más rápido posible para evitar que la probeta pierda la temperatura.
- c) Una vez que se obtiene la lectura del (P_i) se introduce rápidamente la probeta en la Máquina de los Ángeles, después se le coloca la tapa y se colocan los tornillos en la misma para asegurarla.
- d) A continuación se enciende la Máquina de los Ángeles hasta que transcurren 300 revoluciones.
- e) Una vez que se han cumplido las 300 revoluciones, se retira la tapa de la Máquina de los Ángeles para sacar la fracción de probeta que ha quedado tras someterla a la prueba de desgaste, se pesa en la báscula analítica y obtenemos de esta manera el peso final (P_f).

5.3.- Análisis por envejecimiento (susceptibilidad al envejecimiento).

El análisis por envejecimiento de las probetas Marshall se llevará a cabo durante un tiempo total de 32 h. Pero para esto se van a ensayar probetas a 2, 4, 8, 16 y 32 h de envejecimiento, por lo que se envejecerán en el horno 18 probetas para cada uno de los rangos de tiempo ya que son 6 tipos de filler.

El procedimiento para ensayar las probetas Marshall para susceptibilidad al envejecimiento es el mismo que para las probetas de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica, y se menciona a continuación.

- a) Antes de meter las probetas al horno eléctrico de ventilación forzada debemos colocarles una malla rígida de acero para evitar que las probetas se deformen durante el envejecimiento ya que van a estar sometidas a una temperatura de 165°C.
- b) Una vez que las probetas han sido cubiertas con la malla rígida de acero estas se meten al horno a 165° C $\pm$ 1.
- c) Las probetas se sacarán del horno una vez que el tiempo de 2, 4, 8, 16 y 32 h de envejecimiento se haya cumplido, es decir cada que se haya cumplido el tiempo

de envejecimiento se sacarán 3 probetas de cada uno de los 6 diferentes tipos de filler a ensayar.

- d) Una vez que se han sacado las probetas del horno se dejan enfriar y una vez que se han enfriado se les retira la malla rígida de acero.
- e) Se recomienda que las probetas que se envejecerán de 4 a 36 h se volteen cada 2 h para evitar la acumulación de ligante en la base de la probeta por escurrimiento. Es decir a la temperatura a la que se encuentra el horno es muy alta lo cual hace que el asfalto se vuelva líquido y por lo tanto puede haber pérdidas.
- f) Una vez que ha transcurrido el tiempo de envejecimiento de las probetas y una vez se han enfriado se les retira la protección y se pesan para obtener el peso inicial (P_i) de la probeta, finalmente se ensayan a temperatura ambiente en la máquina de los ángeles hasta que se cumplen 300 revoluciones.
- g) Finalmente una vez que se cumplieron las 300 revoluciones se saca el fragmento más grande que ha quedado de la probeta y se pesa en la báscula analítica para obtener su peso final (P_f).

CAPÍTULO 6

PRUEBAS DE LABORATORIO (FASE EXPERIMENTAL).

6.1.- Materiales.

a) Material pétreo

Para la realización del presente trabajo de investigación se utilizaron agregados pétreos de diferentes bancos de la región de Morelia, además de cemento, agregado de piedra caliza y cal comercial, para la obtención de los diferentes tipos de filler a emplear para la fabricación de las probetas Marshall a ensayar con el Método UCL®. Los bancos de material de los que se obtuvieron estos materiales son: Arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Banco AGC, Banco Cerritos, polvo de piedra caliza, además de cal marca CAL HIDRA, y cemento comercial marca APASCO CPC 30.

El material pétreo del banco AGC ubicado en la salida a Salamanca se utilizó como material patrón para la fabricación de la mezcla asfáltica a la cual se le cambiará el tipo de filler para llevar a cabo el análisis del comportamiento de la misma.

b) Material asfáltico.

Para la fabricación o elaboración de las probetas se utilizó asfalto AC-20 procedente de la refinería de Salamanca el cual fue suministrado por dos empresas, el asfalto procedente del lote de la empresa **SIOBI** se utilizó para elaborar las probetas que se analizaron por susceptibilidad térmica y susceptibilidad al envejecimiento para los 6 tipos de filler y para la elaboración de las probetas ensayadas por susceptibilidad a la humedad se utilizó el asfalto procedente del lote de la empresa **Grupo de Oro** ubicado en ciudad industrial, Morelia Michoacán México.

6.2.- Fase experimental.**6.2.1.- Límites de consistencia.**

Estas pruebas permiten conocer las características de plasticidad de la porción de los materiales para terracerías que pasan la malla No. 40 (0.425mm), cuyos resultados se utilizan principalmente para la identificación y clasificación de los suelos. Las pruebas consisten en determinar el límite líquido, es decir, el contenido de agua para el cual un suelo plástico adquiere una resistencia al corte de 2.45 kPa (25 g/cm²); éste se considera como la frontera entre los estados semilíquidos y plástico. El límite plástico o el contenido de agua para el cual un rollito se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3mm; éste se considera como la frontera entre los estados plástico y semisólido. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico.

6.2.1.1.- Equipo y materiales para la prueba.

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

- **Malla No. 40**

Fabricada con alambres de bronce o de acero inoxidable, tejidos en forma de cuadrícula, con abertura nominal de 0.425mm. El tejido estará sostenido mediante el bastidor circular metálico, de lámina de bronce o latón, de 206±2 mm de diámetro interior y 68 ±2 mm de altura, sujetando la malla rígida y firmemente mediante un sistema de engargolado de metales, a una distancia de 50 mm del borde superior del bastidor.

- **Copa de Casa grande.**

Calibrada para una altura de caída de 1 cm, provista de un ranurador plano, con las características que se indican en la figura 9.

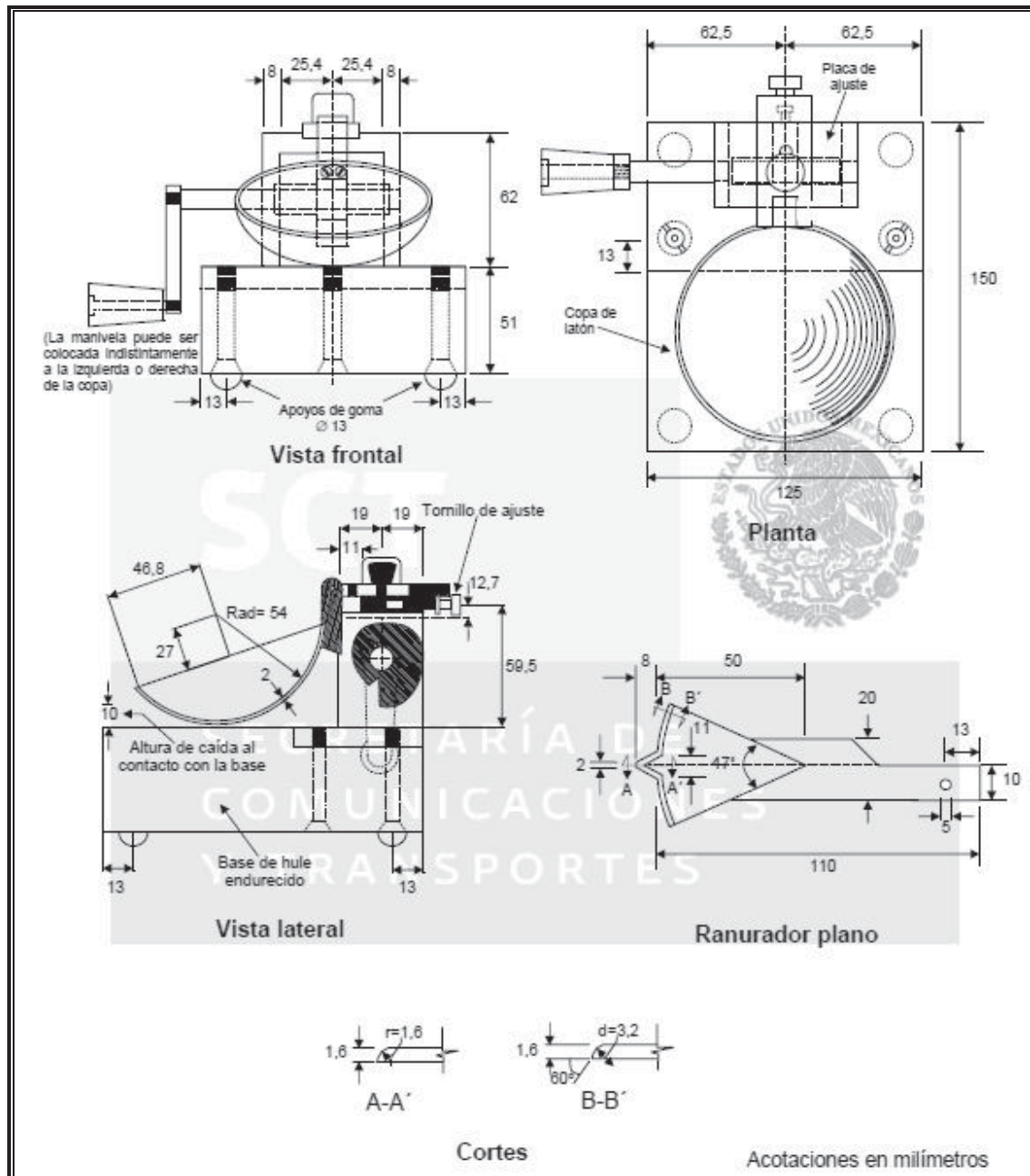


FIGURA 9 Copa de Casa Grande

- **Balanza.**

De 2000 g de capacidad y aproximación de 0.01 g.

- **Horno.**

Eléctrico o de gas, con termostato capaz de mantener una temperatura constante de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

- **Desecador.**

De cristal, de tamaño adecuado según las dimensiones de los recipientes que contendrán muestras de prueba, con cloruro de calcio anhidro como elemento desecador.

- **Vaso o recipiente.**

De 0.5 L de capacidad.

- **Cápsulas de porcelana.**

De 12 cm de diámetro.

- **Espátula flexible.**

De acero inoxidable, de 7.5 cm de longitud y 2 cm de ancho, con punta redonda.

- **Cuentagotas.**

De vidrio o metal.

- **Vidrios de reloj.**

Refractarios para el secado del material.

- **Paño.**

De material absorbente, de 60 X 60 cm.

- **Placa de vidrio.**

Con dimensiones mínimas de 40 X 40 cm por lado y 0.6 cm de espesor.

- **Alambre de acero.**

De 3mm de diámetro y 10cm de longitud.

Calibración del equipo.

Antes de cada prueba se verificará que la altura de caída de la copa de Casagrande sea de 1 cm, utilizando para ello el mango calibrado del ranurador, que tiene precisamente esa dimensión. Si la altura de caída es diferente, el aparato debe corregirse mediante los tornillos de ajuste.

6.2.1.2.- Preparación de la muestra.

La preparación de la muestra de materiales para terracerías se hace de la siguiente manera:

- De la muestra de material se aparta una porción de tamaño tal que, una vez cribada en forma manual por la malla No. 40 (0.425 mm), se obtengan aproximadamente 300 g del material que pase esa malla; éste se coloca en una charola.
- Se separan aproximadamente 250 g, se obtienen y se registra la masa del material separado, con aproximación de 0.01g.
- Se coloca el material separado en un recipiente apropiado, se le agrega el agua necesaria para saturar el material y se deja en reposo durante aproximadamente 24 h, en un lugar fresco, cubriendo el recipiente con un paño que se mantendrá húmedo a fin de reducir al mínimo la pérdida de agua por evaporación.

6.2.2.-Determinación del límite líquido (ω_L) por el procedimiento estándar.**6.2.2.1.-Equipo y materiales.**

El equipo necesario para efectuar esta prueba es: copa de Casagrande, balanza, horno, desecador, vaso o recipiente, cápsula de porcelana donde se homogeniza utilizando la espátula.

6.2.2.2.- Procedimiento de prueba.

1. De la fracción del material preparada de acuerdo con lo indicado en la sección “preparación de la muestra” mencionada anteriormente, se toma una porción de aproximadamente 150 g que se coloca en la cápsula de porcelana donde se homogeniza utilizando la espátula.

2. En la copa de Casagrande, previamente calibrada, se coloca una cantidad suficiente de material para que, una vez extendido con la espátula, se alcance un espesor de 8 a 10 mm en la parte central de la copa, considerando lo siguiente:
 - Para evitar que el material colocado sobre la copa se insuficiente, es conveniente poner una cantidad ligeramente mayor y eliminar el sobrante al enrasarlo con la espátula.
 - Para extender el material se procede del centro hacia los lados sin aplicar una presión excesiva y con el mínimo de pasadas de la espátula, como se muestra en la figura 10.
3. Mediante una pasada firme del ranurador se hace una abertura en la parte central del material contenido en la copa, para lo cual, el ranurador se mantendrá siempre normal a la superficie interior de la copa, como se observa en la figura 11.



FIGURA 10 Acomodo del material en la copa de determinación del Límite Líquido



FIGURA 11 Formación de la ranura en la de Casagrande.

4. La ubicación, forma y dimensiones que tendrá la ranura en su parte central se ilustra en la figura 12.

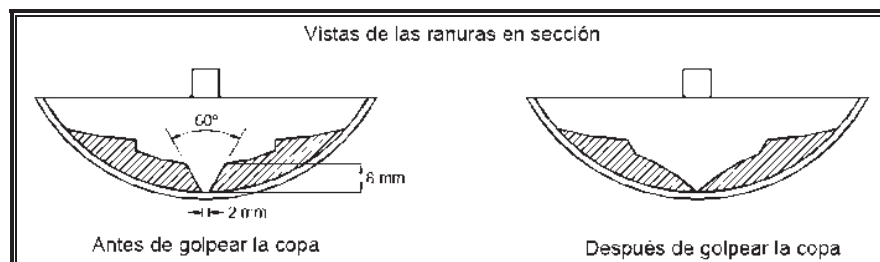


FIGURA 12 Forma y dimensiones de la ranura

5. Inmediatamente después de colocado y ranurado el material, se acciona la manivela del aparato para hacer caer la copa a razón de 2 golpes por segundo, y se registra el número de golpes necesarios para lograr que los bordes inferiores de la ranura se pongan en contacto en una longitud de 13 mm.
6. Logrado lo anterior se toman con la espátula aproximadamente 10 g de material de la porción cerrada de la ranura y, para determinar su contenido de agua ω_n , después se colocan en un vidrio de reloj del que previamente se ha determinado su masa.
7. Una vez que se ha tomado la porción requerida para la determinación del contenido de agua, el material restante se reintegra a la cápsula de mezclado, para lavar y secar la copa y el ranurador.
8. Inmediatamente, mediante el cuentagotas, se agrega agua al material en la cápsula y se homogeniza con la espátula; dicho material se prueba según se indicó del punto 2 al 7. Este procedimiento se repite hasta completar cuatro determinaciones, que se registran en el formato que se muestra en las tablas de resultados. La cantidad de agua que se adicione al material será tal que las cuatro determinaciones queden comprendidas entre 10 y 35 golpes en la copa de Casagrande, siendo necesario obtener dos valores por arriba y dos por abajo de los 25 golpes, ya que para consistencias menores de 10 golpes es difícil identificar el momento de cierre de la ranura en la longitud especificada y para más de 35 golpes se dificulta la ejecución de la prueba.
9. Se grafica los puntos correspondientes a cada determinación, representando en el eje de las abscisas en escala logarítmica, el número de golpes " n " y en el de las ordenadas en escala aritmética, los respectivos contenidos de agua ω_n . Se traza una línea recta que una aproximadamente los puntos graficados; a esta recta se le llama curva de fluidez (línea de tendencia).

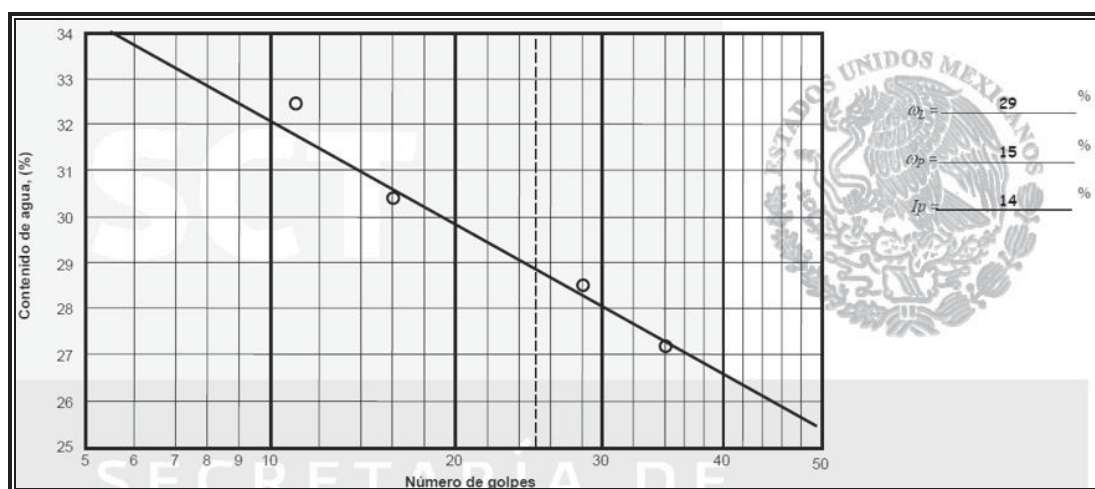


FIGURA 13 Gráfica para determinar los límites de plasticidad.

6.2.2.3.- Cálculos y resultados.

De la figura 13 se obtiene el valor del límite líquido (ω_L), determinando en la curva de fluidez el contenido de agua correspondiente a 25 golpes.

Precauciones.

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se indican las siguientes precauciones.

- Que la prueba se realice en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que puedan provocar la alteración de materiales.
- Que todo el equipo esté perfectamente limpio y funcional, especialmente la copa y el ranurador deberán estar limpios, calibrados y sin indicios de desgaste.
- Que las dimensiones del ranurador que se utilice sean las especificadas.
- Que al efectuar la prueba, la ranura se cierre debido al flujo provocado por los golpes y no al deslizamiento de la muestra sobre la copa o a la presencia de burbujas de aire entre el material y la copa, originadas por una mala colocación de éste y que ocasionan que fluya con mayor facilidad.
- Que la cantidad de material colocado en la copa sea suficiente para tener un espesor mínimo de 8 mm dentro de la copa.
- Que la caída de la copa se efectúe a un ritmo uniforme de 2 golpes por segundo.
- Que la forma, dimensiones y ubicación de la ranura sean las indicadas.
- Que no se incorpore material seco para reducir el contenido de agua de la porción que se prueba y que se efectúe un amasado correcto de ésta.

6.2.3.- Determinación del límite plástico (ω_p).

6.2.3.1.- Equipo y materiales.

El equipo necesario para efectuar esta prueba es la balanza, horno, desecador, cápsulas de porcelana, espátulas, vidrios de reloj, placa de vidrio mismos que se describieron anteriormente.

6.2.3.2.- Procedimiento de prueba.

- De la fracción del material preparado de acuerdo con el apartado “preparación de muestra” antes mencionado, se toma una porción de tamaño tal que se pueda formar una pequeña esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro, la que se moldea con los dedos para que pierda agua y se manipula sobre la palma de la mano para formar un cilindro.
- A continuación el cilindro se hace girar con los dedos de las manos sobre la placa de vidrio para reducir su diámetro hasta que sea aproximadamente de 3mm en toda su longitud, como se muestra en la figura 14. La velocidad de girado será de 60 a 80 ciclos por minuto, entendiéndose por “ciclo” un movimiento de la mano hacia adelante y hacia atrás, hasta volver a la posición de la partida.
- Si al alcanzar un diámetro de 3mm el cilindro no se rompe en tres secciones simultáneamente, significa que su contenido de agua es superior al del límite plástico (ω_p). En tal caso se junta nuevamente todo el material para formar la pequeña esfera, manipulándola con los dedos para facilitar su pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma, repitiendo el procedimiento descrito en los 2 puntos anteriores, hasta que el cilindro se rompa en tres segmentos precisamente en el momento de alcanzar dicho diámetro, el cual se verifica comparándolo contra el alambre de referencia.

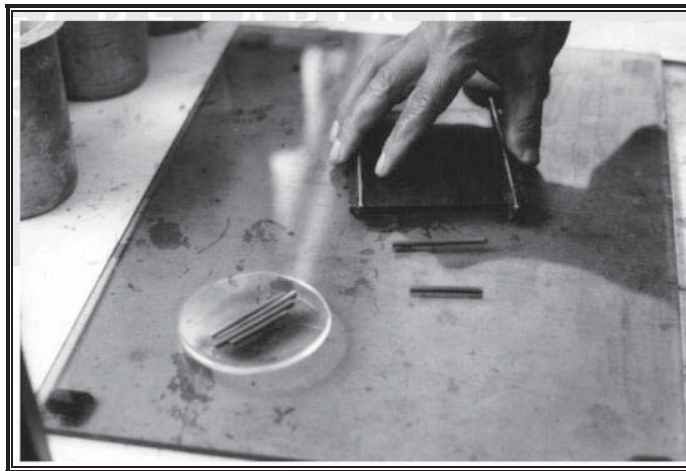


FIGURA 14 Operación para formar el cilindro de material en la determinación del límite plástico.

- Inmediatamente se colocan sobre un vidrio de reloj los fragmentos del cilindro y se determina el contenido de agua de este material, (ω_i), de acuerdo con el Manual M-MMP-1-04 “Contenido de Agua”. Para mayor seguridad en los resultados, la

prueba se efectuará por triplicado, obteniendo para cada una de las determinaciones, el contenido de agua, (ω_i).

Cálculos y resultados.

- Se reporta como resultado de esta prueba, el límite plástico (ω_p), obtenido mediante la siguiente expresión:

$$\omega_p = \frac{\sum \omega_i}{3}$$

Donde:

(ω_p) = Límite plástico de la muestra, (%), con aproximación a la unidad.

(ω_i) = Contenido de agua para cada una de las tres determinaciones, (%).

- Si no es posible formar cilindros del diámetro especificado con ningún contenido de agua, se considera que el material no es plástico; se reporta como NP (no plástico).

Precauciones.

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

- Que la prueba se realice en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que puedan provocar la alteración del material.
- Que todo el equipo esté perfectamente limpio y funcional, especialmente la placa de vidrio deberá estar limpia, calibrados y sin indicios de material.
- Que las operaciones para la obtención de las masas sean lo más precisas posible, ya que la cantidad de material que se toma para determinar el contenido de agua es muy pequeña; cualquier error durante esta operación, influirá notablemente en los resultados.
- Que el cilindro de material no se rompa antes de alcanzar al diámetro de 3mm, ya que en este caso su contenido de agua es menor al límite plástico.

- Que al alcanzar un diámetro de 3mm, el cilindro de material no se rompa en forma deliberada mediante la modificación de la presión y/o de velocidad de rolado.
- Que durante la determinación del contenido de agua se incluyan todos los fragmentos en que se divirtió el cilindro al alcanzar el límite plástico.
- Que no se incorpore material seco para reducir el contenido de agua del material que se prueba, así como cuidar que se efectúe un amasado correcto de éste.

6.2.4.- Determinación del índice plástico.

- Una vez calculados el límite líquido y el límite plástico se determina el índice plástico, mediante la siguiente expresión:

$$I_p = \omega_L - \omega_p$$

I_p = Índice plástico de material, (%), con aproximación a la unidad.

ω_L = Límite líquido del material, en (%).

ω_p = Límite plástico del material en (%).

- Cuando el material sea muy arenoso y no pueda determinarse el límite plástico, se reportan el límite plástico y el índice plástico como NP (No plástico).

6.2.5.- Resultados de la prueba.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos practicados a los 6 diferentes tipos de filler para obtener los Límites de Consistencia.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”

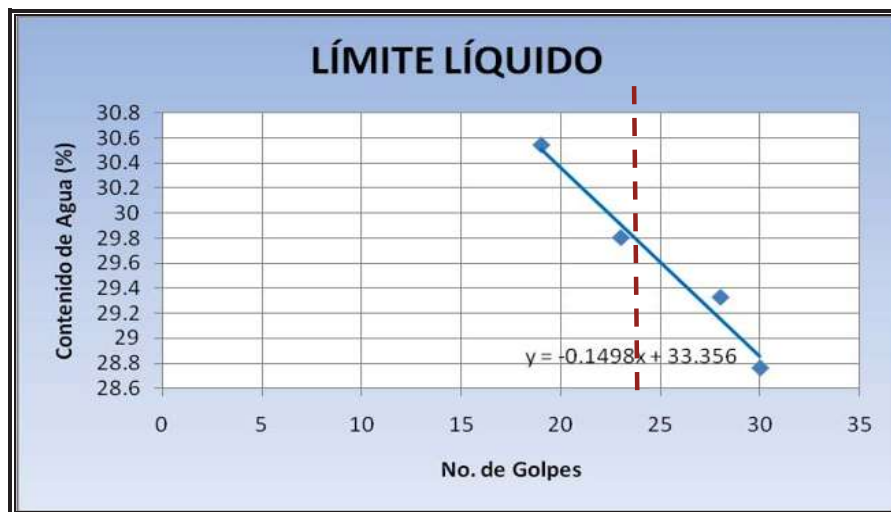


LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Banco AGC

LÍMITE LÍQUIDO.							
Número de Golpes	Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)
30.00	17	28.56	24.05	4.51	8.37	15.68	28.76
28.00	35	28.19	23.65	4.54	8.17	15.48	29.33
23.00	43	29.71	24.81	4.90	8.37	16.44	29.81
19.00	31	30.89	25.63	5.26	8.41	17.22	30.55

LÍMITE PLÁSTICO						
Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)
32	11.7	11.24	0.46	8.35	2.89	15.92
15	12.14	11.63	0.51	8.53	3.1	16.45
S/N	11.68	11.18	0.50	8.15	3.03	16.50



ω_L (%)	ω_p (%)	IP (%)
29.5	16.3	13.2

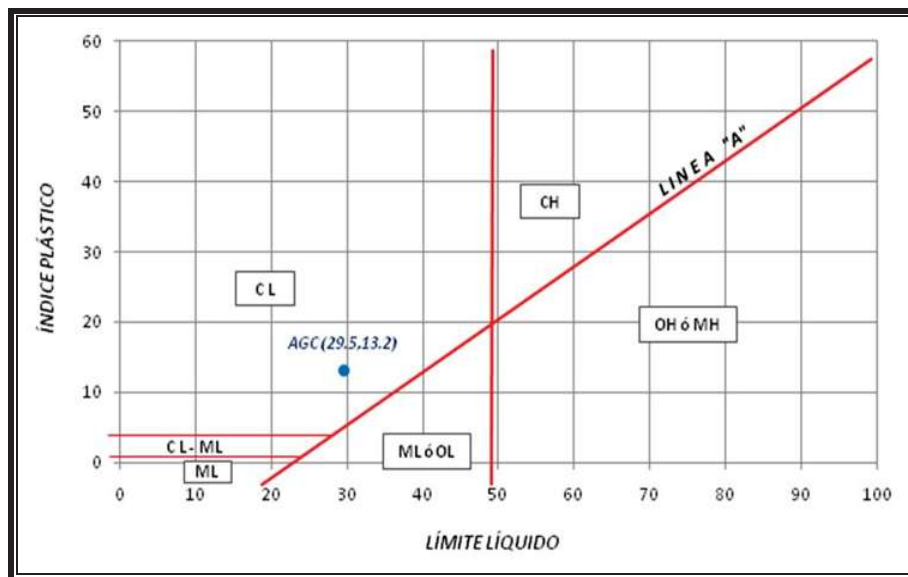


UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Banco AGC



Clasificación SUCS: CL, arcilla inorgánica de baja a media plasticidad, polvo de roca triturada

Cápsula No.	LÍMITE DE CONTRACCIÓN						
	Volumen cápsula (cm³)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso Suelo Húmedo (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Peso de Hg derramado (g)
2	9.7	44.22	39.76	24.16	20.06	15.6	123.64

$$V_2 = 123.64 \div 13.56 \text{ g/cm}^3 = 9.12 \text{ cm}^3$$

$$LC = \frac{w_1 - w_s - (v_1 - v_2)}{w_s} \times 100 = 24.86 \%$$

$$CL = \frac{L_{inicial} - L_{final}}{L_{final}} \times 100 = 3.43 \%$$

Contracción lineal	
$L_{inicial}$ (cm)	L_{final} (cm)
9.97	9.64



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”

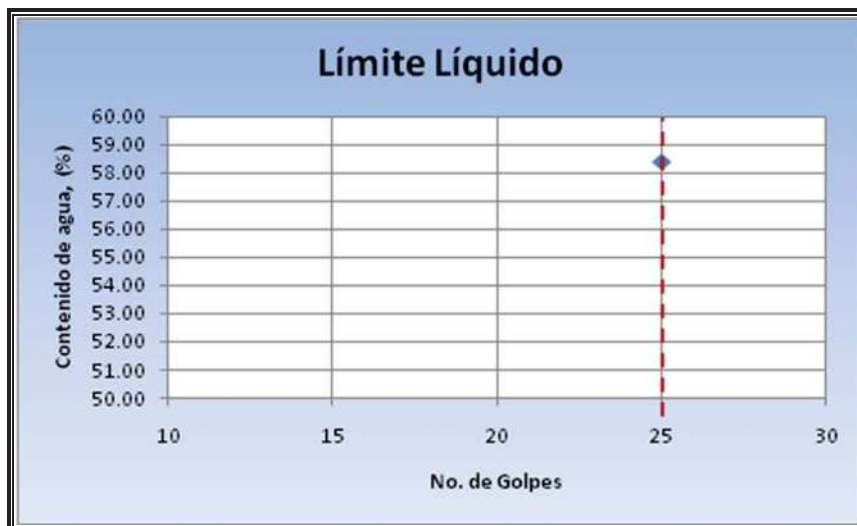


LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria.

LÍMITE LÍQUIDO.							
Número de Golpes	Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)
25	15	30.18	22.20	7.98	8.53	13.67	58.38

LÍMITE PLÁSTICO						
Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)
S/N	14.5	13.29	1.21	8.15	5.14	23.54
2	14.83	13.58	1.25	8.36	5.22	23.95
51	14.61	13.37	1.24	8.17	5.2	23.85



ω_L (%)	ω_p (%)	IP (%)
58.4	23.8	34.6

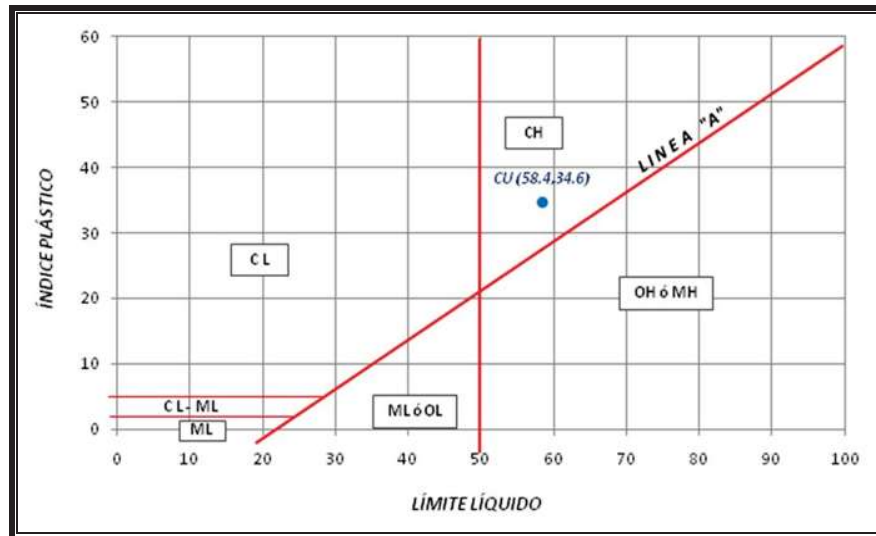


UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria.



Clasificación SUCS: CH, arcilla inorgánica de alta plasticidad formada por descomposición química.

LÍMITE DE CONTRACCIÓN							
Cápsula No.	Volumen cápsula (cm³)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso Suelo Húmedo (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Peso de Hg derramado (g)
15	12.08	46.29	39.33	27.44	18.85	11.89	88.53

$$V_2 = 88.53 \div 13.56 \text{ g/cm}^3 = 6.53 \text{ cm}^3$$

$$LC = \frac{w_1 - w_s - (v_1 - v_2)}{w_s} \times 100 = 11.85 \%$$

$$CL = \frac{L_{inicial} - L_{final}}{L_{final}} \times 100 = 18.29 \%$$

Contracción lineal	
$L_{inicial}$ (cm)	L_{final} (cm)
10.09	8.53



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”

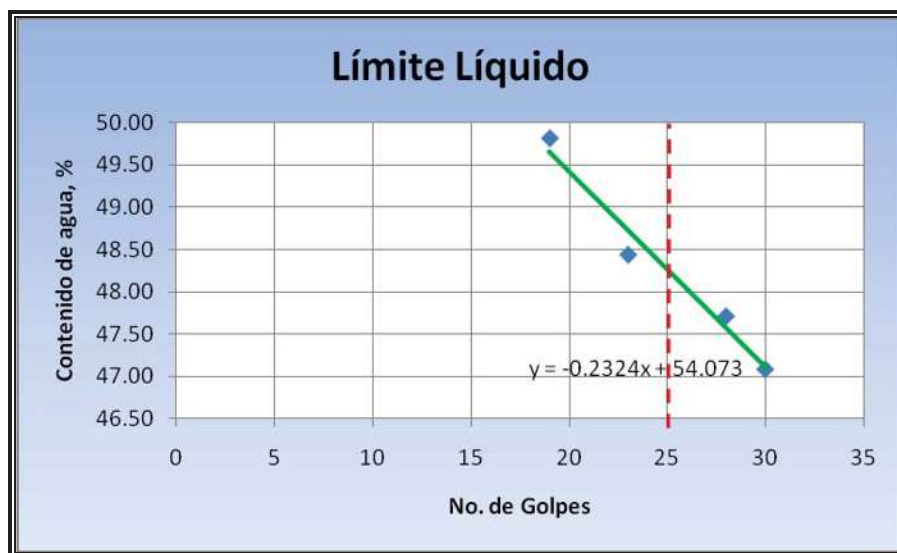


LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Hidróxido de calcio (Cal comercial)

LÍMITE LÍQUIDO.							
Número de Golpes	Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)
30.00	58	24.17	19.16	5.01	8.52	10.64	47.09
28.00	1	25.5	20.6	4.90	10.33	10.27	47.71
23.00	23	25.2	19.77	5.43	8.56	11.21	48.44
19.00	35	24.32	18.95	5.37	8.17	10.78	49.81

LÍMITE PLÁSTICO						
Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)
32	16.74	15.03	1.71	9.79	5.24	32.63
15	15.37	13.67	1.70	8.35	5.32	31.95
S/N	14.95	13.29	1.66	8.17	5.12	16.50



ω_L (%)	ω_p (%)	IP (%)
48.26	32.3	16.1

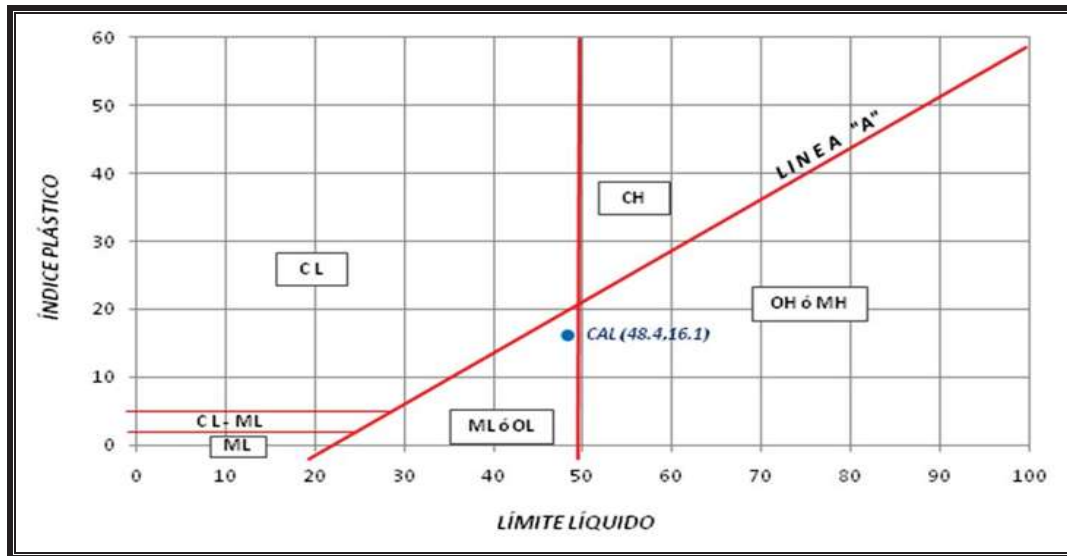


UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES "ING. LUIS SILVA RUELAS"



LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Hidróxido de calcio (Cal comercial)



Clasificación SUCS: OL, limo orgánico o arcilla orgánica de baja plasticidad.

LÍMITE DE CONTRACCIÓN							
Cápsula No.	Volumen cápsula (cm³)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso Suelo Húmedo (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Peso de Hg derramado (g)
6	9.58	39.49	34.4	24.22	15.27	10.18	106.5

$$V_2 = 88.53 \div 13.56 \text{ g/cm}^3 = 7.85 \text{ cm}^3$$

$$LC = \frac{w_1 - w_s - (v_1 - v_2)}{w_s} \times 100 = 33.05 \%$$

$$CL = \frac{L_{inicial} - L_{final}}{L_{final}} \times 100 = 4.06 \%$$

Contracción lineal	
$L_{inicial} \text{ (cm)}$	$L_{final} \text{ (cm)}$
10	9.61



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”

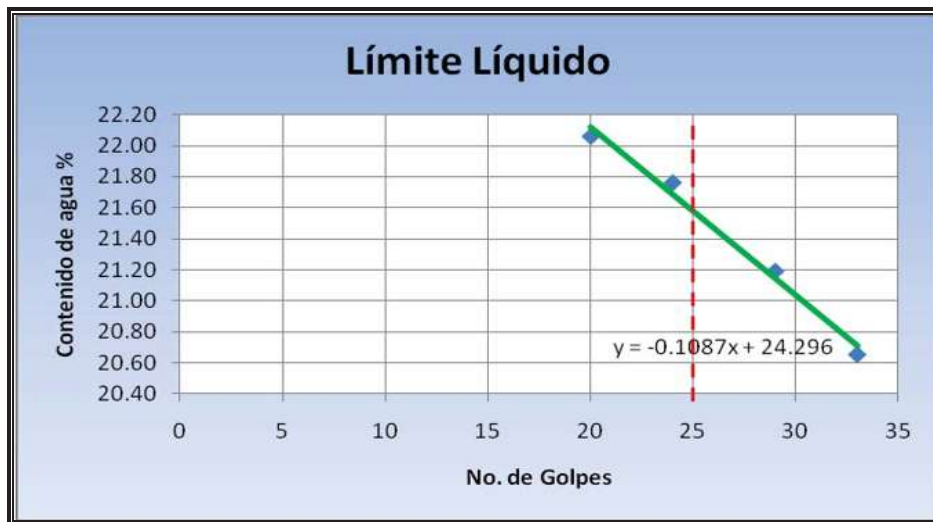


LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Agregado de piedra Caliza.

LÍMITE LÍQUIDO.							
Número de Golpes	Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)
33	8	32.78	28.61	4.17	8.42	20.19	20.65
29	23	33.21	28.9	4.31	8.56	20.34	21.19
24	20	33.84	29.24	4.60	8.1	21.14	21.76
20	35	35.23	30.34	4.89	8.17	22.17	22.06

LÍMITE PLÁSTICO						
Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)
S/N	13.08	12.3	0.78	8.22	4.08	19.12
107	13.3	12.44	0.86	8.1	4.34	19.82
31	13.84	12.94	0.90	8.41	4.53	19.87



ω_L (%)	ω_p (%)	IP (%)
21.58	19.6	2.0

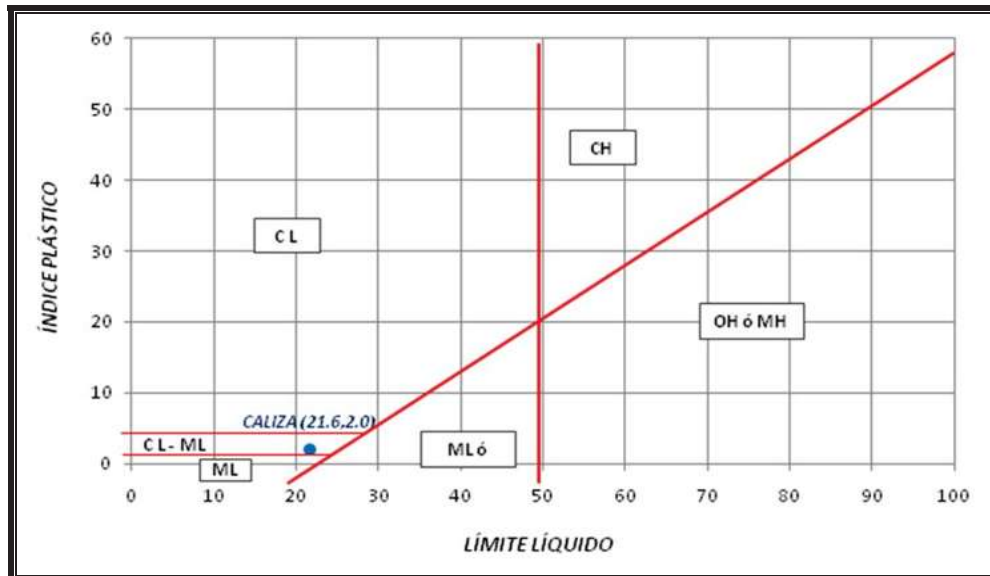


UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Agregado de piedra Caliza.



Clasificación SUCS: *ML, limo inorgánico arenoso o arcilla ligeramente plástica.*

LÍMITE DE CONTRACCIÓN							
Cápsula No.	Volumen cápsula (cm ³)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso Suelo Húmedo (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Peso de Hg derramado (g)
6	9.58	44.77	41.25	24.22	20.55	17.03	122.7

$$V_2 = 88.53 \div 13.56 \text{ g/cm}^3 = 9.05 \text{ cm}^3$$

$$LC = \frac{w_1 - w_s - (v_1 - v_2)}{w_s} \times 100 = 17.55 \%$$

$$CL = \frac{L_{inicial} - L_{final}}{L_{final}} \times 100 = 1.83 \%$$

Contracción lineal	
$L_{inicial}$ (cm)	L_{final} (cm)
10	9.82



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”

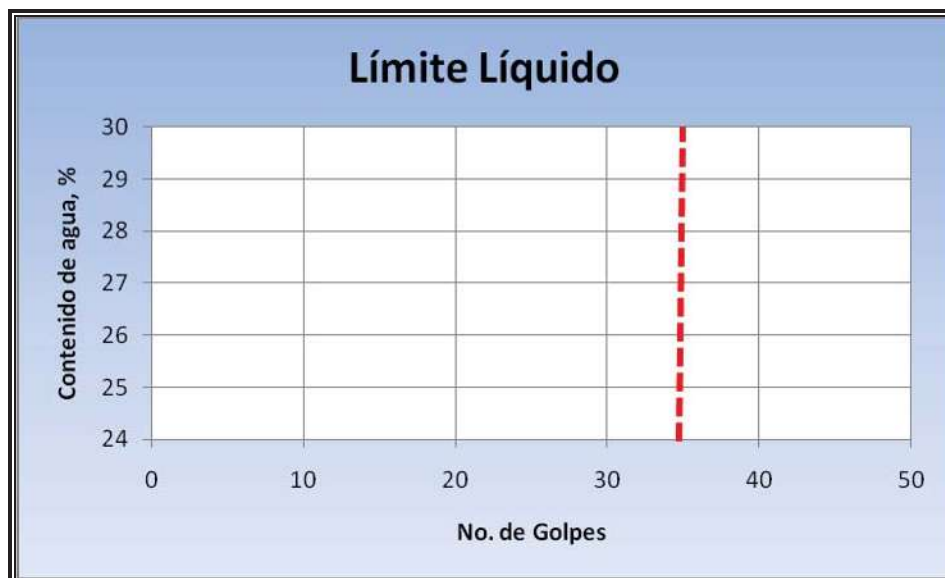


LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Cemento Portland CPC-30.

LÍMITE LÍQUIDO.							
Número de Golpes	Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)

LÍMITE PLÁSTICO						
Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)



w_L (%)	w_p (%)	IP (%)
0	0	0

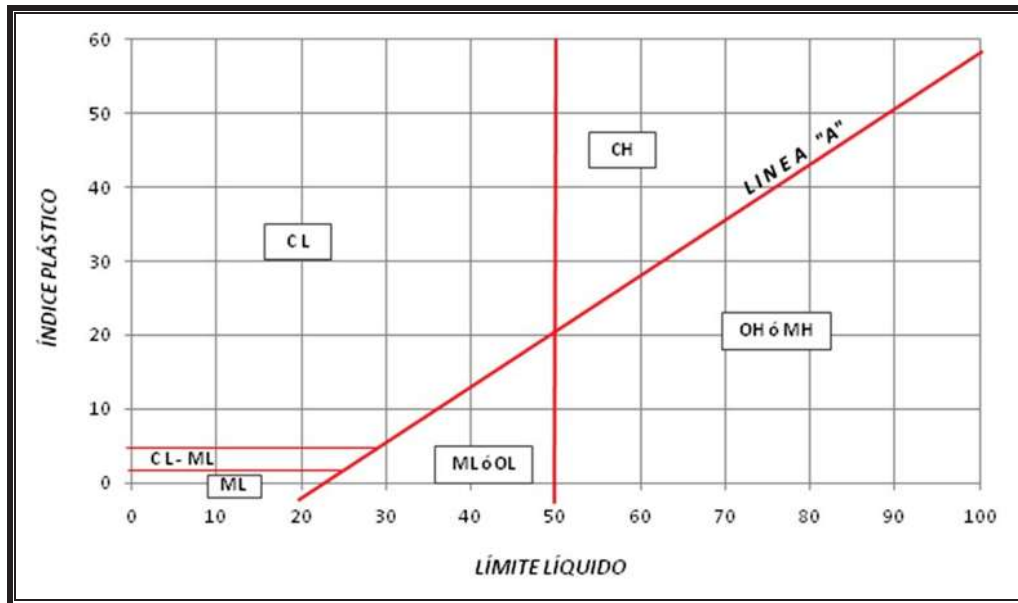


UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES "ING. LUIS SILVA RUELAS"



LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Cemento Portland CPC-30.



Clasificación SUCS: *No hay clasificación.*

LÍMITE DE CONTRACCIÓN							
Cápsula No.	Volumen cápsula (cm³)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso Suelo Húmedo (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Peso de Hg derramado (g)
0	0	0	0	0	0	0	0

$$V_2 = 88.53 \div 13.56 \text{ g/cm}^3 = 0 \text{ cm}^3$$

$$LC = \frac{w_1 - w_s - (V_1 - V_2)}{w_s} \times 100 = 0 \%$$

$$CL = \frac{L_{inicial} - L_{final}}{L_{final}} \times 100 = 0 \%$$

Contracción lineal	
$L_{inicial} \text{ (cm)}$	$L_{final} \text{ (cm)}$
0	0



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”

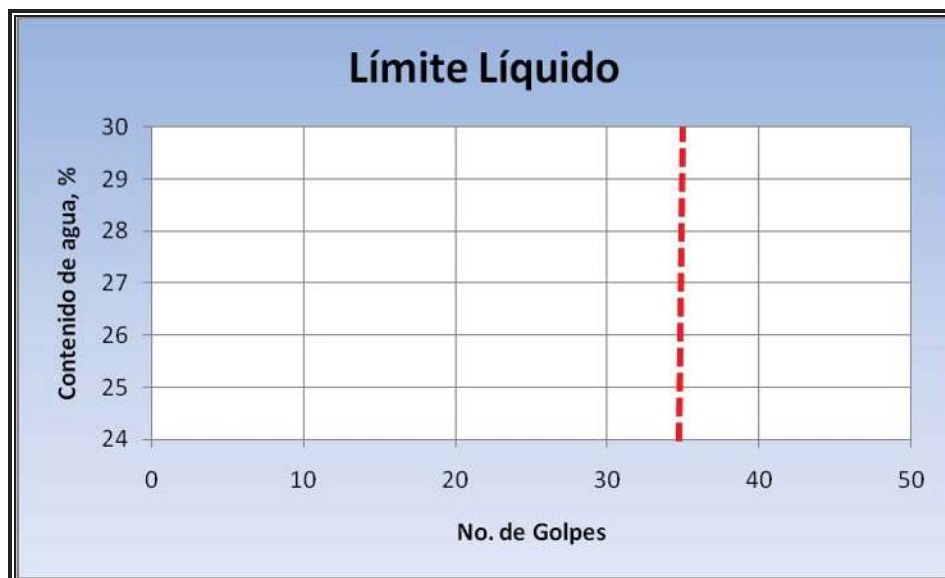


LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Agregado de piedra Caliza

LÍMITE LÍQUIDO.							
Número de Golpes	Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)

LÍMITE PLÁSTICO						
Cápsula No.	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Agua (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Contenido de Agua (w) (%)



ω_L (%)	ω_p (%)	IP (%)
0	0	0

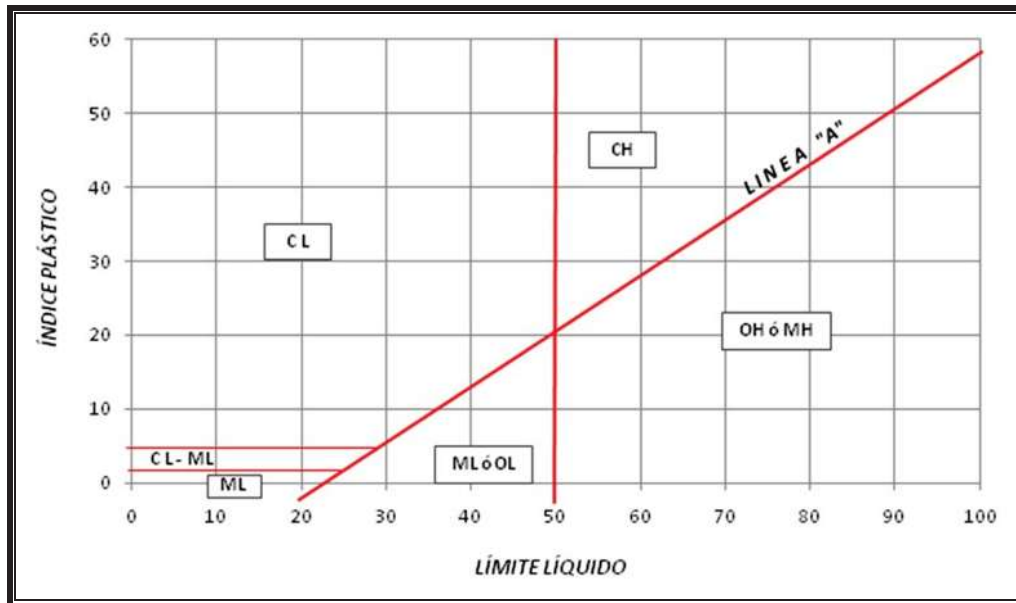


UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES "ING. LUIS SILVA RUELAS"



LÍMITES DE CONSISTENCIA

Muestra: Agregado de piedra Caliza.



Clasificación SUCS: *No hay clasificación.*

LÍMITE DE CONTRACCIÓN							
Cápsula No.	Volumen cápsula (cm³)	Peso Cápsula + Suelo Húmedo (g)	Peso Cápsula + Suelo Seco (g)	Peso de Cápsula (g)	Peso Suelo Húmedo (g)	Peso de Suelo Seco (g)	Peso de Hg derramado (g)
0	0	0	0	0	0	0	0

$$V_2 = 0 \div 13.56 \text{ g/cm}^3 = 0 \text{ cm}^3$$

$$LC = \frac{w_1 - w_s - (v_1 - v_2)}{w_s} \times 100 = 0 \%$$

$$CL = \frac{L_{inicial} - L_{final}}{L_{final}} \times 100 = 0 \%$$

Contracción lineal	
$L_{inicial} \text{ (cm)}$	$L_{final} \text{ (cm)}$
0	0

6.2.6 Equivalente de Arena.

Es una prueba que permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. La prueba consiste en agitar un cilindro, que contiene una muestra del material pétreo que pasa por la malla No. 4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla.

6.2.6.1.- Equipo y materiales para la prueba.

El equipo para la ejecución de la prueba estará en condiciones de operación, calibrado completo en todas sus partes. Todos los materiales por emplear serán de alta calidad, siempre con la fecha de caducidad. Los materiales los mencionamos a continuación.

Cilindro de prueba.

De acrílico transparente, con diámetro interior de 3.15 cm (1 ¼") y altura de 43cm (17"), graduado a cada 1mm, desde el fondo hasta una altura de 38.1cm (15"), que permita medir los niveles de arena sedimentada y de finos suspendidos.

Tapón de hule.

Que permita tapar herméticamente al cilindro descrito en la Fracción anterior, a fin de evitar la pérdida de materiales o de solución.

Tubo Irrigador.

Que conste de una tubería de cobre o latón, con diámetro exterior de 0.63cm (1/4"), con uno de sus extremos cerrados formando una punta en forma de cuña. Contará con dos perforaciones laterales hechas con una broca No.60, en los lados planos de la cuña, cerca de la punta.

Botella (para almacenar la solución de trabajo)

Con capacidad aproximada de 4L, con equipo sifón, lo anterior consiste en un tapón con dos orificios y un tubo de cobre doblado, como el mostrado en la figura 15.

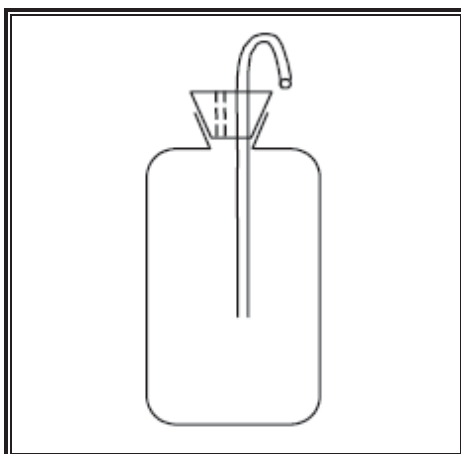


FIGURA 15 Botella con sifón para almacenamiento de solución de trabajo.

Solución de trabajo.

Para preparar la solución de trabajo, en la botella equipada con el equipo sifón se diluyen de la solución de reserva en 3.8 L de agua destilada.

La solución de reserva está compuesta por cloruro de calcio anhidro, glicerina USP y Formaldehído RA (Solución volumétrica al 40%).

Soporte o dispositivo de posicionamiento.

Que permita ubicar la botella y todo el dispositivo del sifón a la altura y de la forma indicada en la figura 17.

Manguera de hule.

Para conectar el sifón irrigador, de 0.48 cm (3/16") de diámetro, con una pinza para obturarla.

Pisón.

Como el que se muestra en la figura 16, formado por una varilla de 46 cm de longitud y 0.63 cm (1/4") de diámetro. En su extremo superior contará con un lastre suficiente para que la masa total del dispositivo sea de 1 Kg. Y en el otro extremo tendrá una base hexagonal cónica. Tendrá un indicador del nivel de la arena en su parte media que ajuste en el interior del cilindro de prueba.

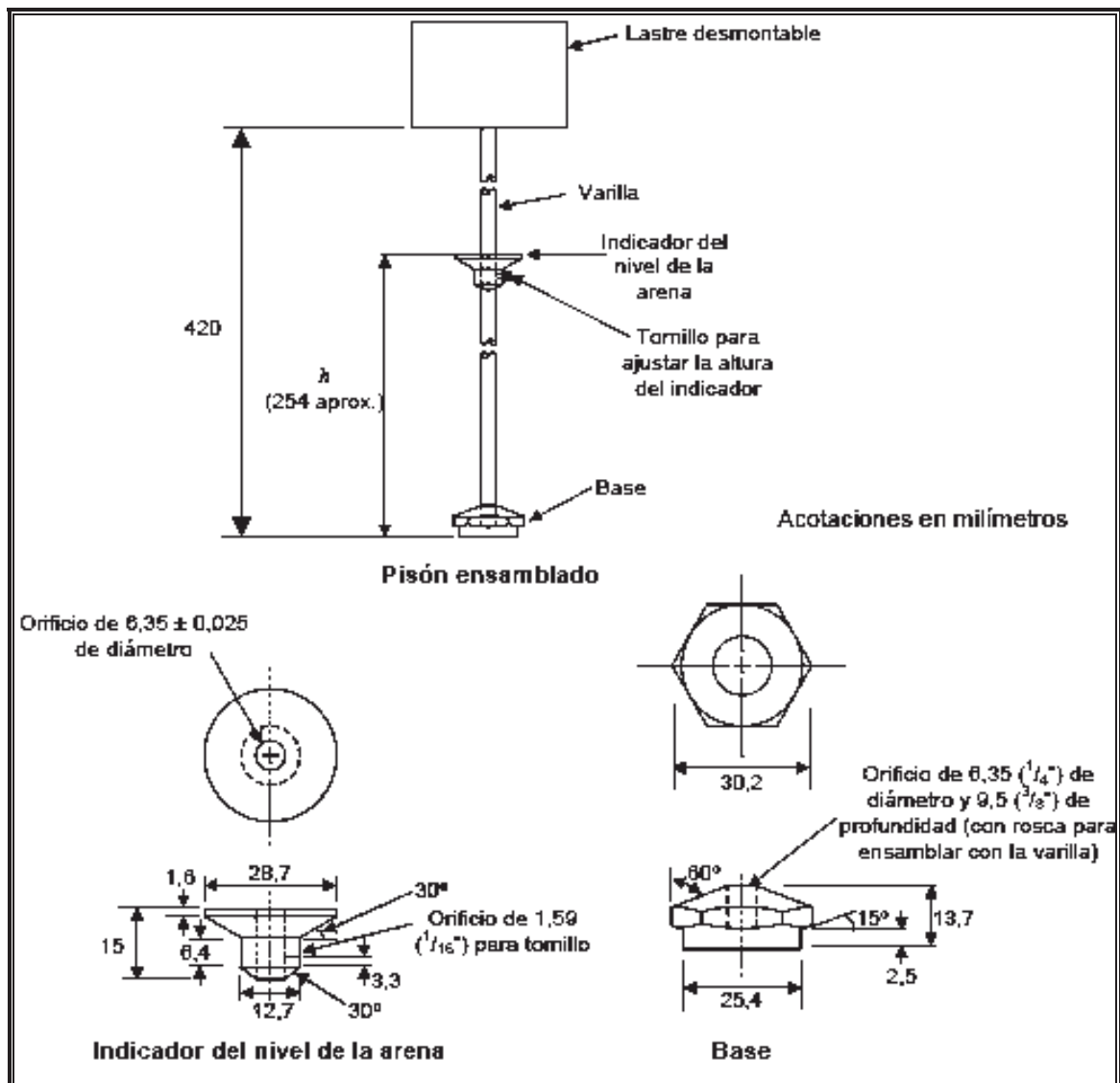


FIGURA 16 Pisón

Cápsula.

Con capacidad de 90 ml.

Embudo de Boca Ancha.

Para depositar la muestra dentro del cilindro.

Malla No. 4.

Fabricada con alambre de bronce o de acero inoxidable, tejido en forma de cuadrícula y con aberturas de 4.75mm.

Balanza.

Con capacidad de 2000 grs. y aproximación de 0.1grs.

6.2.6.2.- Preparación del equipo.

La botella equipada con el equipo sifón se coloca de tal manera que la salida del líquido quede a 92 cm de altura con relación a la superficie de la mesa de trabajo como se muestra en la figura 17.

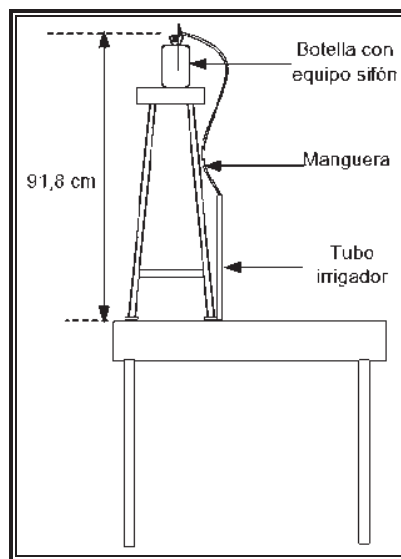


FIGURA 17 Habilitado del sifón

6.2.6.3.-Procedimiento de la prueba.

- Una vez preparado el sifón, se sopla dentro de la botella por la parte superior o a través de un pequeño tubo estando abierta la pinza, para que el sifón quede listo para usarse.



FIGURA 18 Preparación de muestras para el Equivalente de Arena

- Se prepara el material al cual se le realizará la prueba, como se muestra en la figura 18.
- Ya que se mezcló bien el material, se vierte en la capsula en tres capas, dándole pequeños golpes contra la mesa para que este se distribuya bien y además eliminar el aire que pueda estar atrapado entre las partículas del material y finalmente se enrasa la capsula, retirando de esta el material en exceso.



FIGURA 19 Material para prueba del Equivalente de arena (Probetas, capsula de aluminio, tapón y navaja de cutter para enrasar la capsula.

- Por medio del sifón, se introduce la solución de trabajo al cilindro hasta una altura de 10 cm (4").
- Con la ayuda del embudo, se vacía al cilindro de prueba la muestra de material contenida en la cápsula, golpeando firmemente varias veces el fondo del cilindro contra la palma de la mano para eliminar las burbujas de aire atrapado dentro del material y acelerar la saturación de la muestra.
- Se deja reposar la muestra durante 10 min, se cierra el cilindro de prueba con un tapón y se agita manualmente o con equipo, pero en este caso lo hicimos manualmente.
- Agitado Manual: Se agita vigorosamente el cilindro colocado en posición horizontal de un lado a otro en sentido longitudinal durante 90 ciclos en un tiempo de 30 s. Con una carrera aproximada de 20 cm, entendiendo que un ciclo comprende un

movimiento completo de oscilación, es decir, de un lado a otro hasta concluir en la posición de partida.



FIGURA 20 Ejemplo de la prueba "Equivalente de arena"

- Concluida la agitación, se coloca el cilindro sobre la meza de trabajo y se le quita el tapón, inmediatamente se le inserta el tubo irrigador con el cual se lavan las paredes del cilindro de arriba abajo hasta concluir en el fondo con el fin de hacer la irrigación uniforme en todo el recorrido, se gira el cilindro conforme avanza el tubo irrigador, propiciando la separación entre el material arcilloso y el arenoso.
- Cuando el nivel del líquido llegue a 38.1cm (15"), medido sobre la escala del cilindro de prueba, se extrae lentamente el tubo irrigador sin cortar el flujo de solución, de manera que el nivel del líquido se mantenga en los 38.1cm después de retirar completamente el tubo.
- Se deja reposar el cilindro durante 20 min, evitando cualquier movimiento o vibración durante este período, transcurrido el tiempo, la arena se ha sedimentado y los finos permanecen en suspensión.
- Se mide y registra como (LNS_{finos}) el nivel superior de los finos en suspensión, con aproximación de 2mm (0.1" aprox.). Dicha lectura se hará en condiciones de iluminación que permitan apreciar claramente el nivel el nivel máximo de las partículas, observando el cilindro desde uno de sus lados, de tal manera que la

línea de visión forme un ángulo recto con la pared del cilindro, como se muestra en la figura 21.

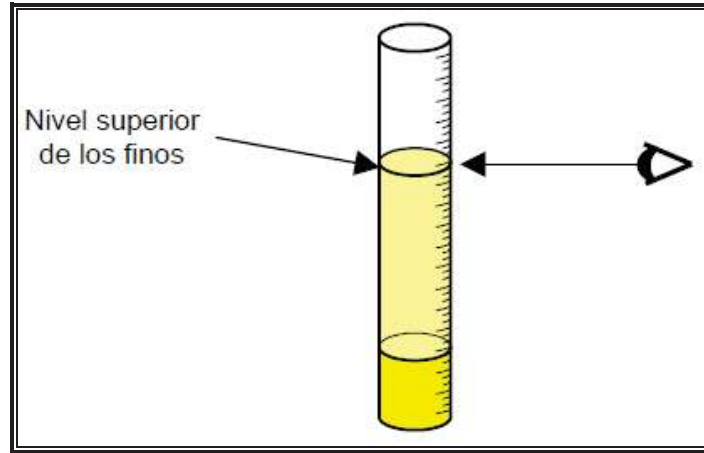


FIGURA 21 Medición del nivel de finos

- A continuación se introduce lentamente la varilla con pisón dentro del cilindro, cuidando de no formar turbulencias, hasta que la base descanse sobre la arena, como se muestra en la figura 22. Se observa el nivel de la parte superior del indicador en la escala del cilindro, se resta la altura " h " (254mm aprox.) y se registra como el nivel superior de la arena (LNS_{arena}), con aproximación de 2mm (0.1" aprox.), durante la medición se tendrán las mismas consideraciones que se mencionaron anteriormente.

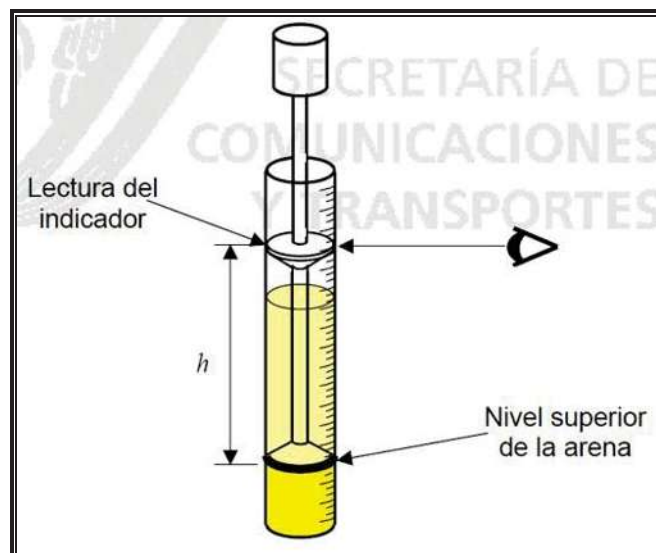


FIGURA 22 Medición del nivel de arena.

- Una vez concluida la prueba, se limpia el cilindro, tapándolo y agitándolo en posición vertical; se voltea y se destapa para vaciarlo inmediatamente. Para finalizar se lava dos veces con agua, hasta eliminar cualquier residuo de material en su interior.

Cálculos y resultados.

- Los cálculos de la prueba “Equivalente de arena”, se realizan con la siguiente fórmula.

$$\%EA = \left(\frac{LNS_{arenas}}{LNS_{finos}} \right) \times 100$$

Donde:

$\%EA$ = Equivalente de arena (%)

LNS_{finos} = Nivel superior de los finos, (cm)

LNS_{arena} = Nivel superior de la arena, (cm)

Si el valor del Equivalente de arena es inferior al valor indicado en la N-CMT-4-04, “Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas” para el material de que se trate, u otro valor especificado, se ejecutará la prueba dos veces más, utilizando la misma muestra original.

En caso de que se hayan hecho tres pruebas, el equivalente de arena por reportar será el promedio de los tres resultados calculados con la expresión indicada anteriormente.

6.3.- Muestreo de materiales pétreos para fabricación de probetas.

El Método UCL® (Método Universal de Caracterización de Ligantes) requiere de una granulometría especial para la fabricación de las probetas que van a ser ensayadas, para elaborar las pastillas se requieren 2 fracciones de agregados pétreos, la primera comprendida entre 5 y 2.5mm, la segunda entre 2.5 y 0.63mm, pero en el laboratorio “Ing. Luis Silva Ruelas” de La Facultad de Ingeniería Civil no hay mallas que tengan estas aberturas y comercialmente no existen estos tamaños de malla en México, por lo que se utilizaron las aberturas de malla más próximas a estas medidas y las mostramos en la tabla 23.

Tabla 23 Tabla de equivalencias de Tamiz

Abertura de tamiz solicitada por el método (mm).	Tamiz con la abertura más próxima	Abertura en (mm).	Aplicación de la abertura
5	No.4	4.75	Material retenido se desecha
2.5	No.8	2.38	Material retenido (Fracción gruesa)
0.63	No.30	0.59	Material retenido (Fracción fina)
equivalente a malla 200	No.200	0.005	Material que pasa (Filler)

1. Lo primero que hicimos fue obtener el material de los bancos AGC, Cerritos, Arcilla de Ciudad Universitaria, Morelia Michoacán y se compró el agregado de piedra caliza, cal y cemento Portland comercial. Como se muestra en la Figura 23.



FIGURA 23 Muestreo de material.

2. Una vez que obtuvimos el material procedimos a cribarlo para obtener en primer lugar el filler que es el material que pasa la malla No. 200. En total las pastillas a fabricar por cada banco de Material son 45 considerando que se analizarán tres factores (humedad, temperatura y envejecimiento). Para la susceptibilidad a la humedad se analizarán 4 temperaturas (-15, 25, 40 y 70°C), para la susceptibilidad térmica se analizarán 6 temperaturas diferentes (-15, 5, 25, 40, 55 y 70°C) y para el envejecimiento se analizarán a 5 lapsos de tiempo diferentes (2, 4, 8, 16 y 32 h) para esto se criba material hasta obtener 1125 g por cada tipo de filler pero se cribó hasta obtener 2000 g ya que le realizamos algunas pruebas al material, de cada uno de los bancos antes mencionados.

3. El material que no pasaba la malla No. 200 se desechaba y el que pasaba se guardaba en bolsas para evitar que este se contamine y por lo tanto evitar que los resultados se vean afectados.
4. En la Norma Oficial Mexicana N-CMT-4-04/08 **“Materiales pétreos para mezclas asfálticas”** se establecen los requisitos de calidad que deben cumplir los materiales pétreos para mezclas de granulometría densa y abierta. Y para ambos casos establece que el Equivalente de arena tiene el mismo valor igual al 50%. Para revisar si este requisito se cumple, se considera un material pétreo patrón procedente del banco de materiales “SUPRA” el cual es un material triturado, para obtener la granulometría necesaria para realizar esta prueba.

Tabla 24 Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo en (mm) ó (in)				
Abertura (mm)	Designación	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 ½)
Porcentaje que pasa						
50	2"					100
37.5	1 ½"				100	90 - 100
25	1"			100	90 - 100	74 - 90
19	¾"		100	90 - 100	79 - 90	62 - 79
12.5	½"	100	90 - 100	72 - 90	58 - 71	46 - 60
9.5	3/8"	90 - 100	76 - 90	60 - 76	47 - 60	39 - 50
6.3	¼"	70 - 81	56 - 69	44 - 57	36 - 46	30 - 39
4.75	No.4	56 - 69	45 - 59	37 - 48	30 - 39	25 - 34
2	No.10	28 - 42	25 - 35	20 - 29	17 - 24	13 - 21
0.85	No.20	18 - 27	15 - 22	12 - 19	9 - 16	6 - 13
0.425	No.40	13 - 20	11 - 16	8 - 14	5 - 11	3 - 9
0.25	No.60	10 - 15	8 - 13	6 - 11	4 - 9	2 - 7
0.15	No.100	6 - 12	5 - 10	4 - 8	2 - 7	1 - 5
0.075	No.200	2 - 7	2 - 6	2 - 5	1 - 4	0 - 3

Tabla 25 Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL)

Características	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de los Ángeles; %, máximo.	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Para obtener la granulometría para la prueba, se consideró de acuerdo a la tabla 24 un tamaño nominal de material pétreo igual a $\frac{3}{4}$ ", de acuerdo a esta granulometría se calculan los valores medios para la fracción de material que pasa la malla No. 4 como se muestra en la tabla 26. El material que pasa la malla No. 200 será sustituido por cada uno de los 6 diferentes tipos de filler.

Tabla 26 Cantidad en % para preparar una muestra para la prueba de equivalente de arena.

Malla	% que pasa la malla	Equivalente en %
4	42.5	100
10	24.5	57.65
20	15.5	36.47
40	11	25.88
60	8.5	20.00
100	6	14.12
200	3.5	8.24
charola	0	0

El peso de la muestra necesaria para llevar a cabo la prueba de equivalente de arena es de 130 g. La fracción de material en peso que le corresponde a cada uno de los tamaños se muestra en la tabla 27.

Tabla 27 Cantidad de material para preparar una muestra para la prueba equivalente de arena

Para una muestra de 130 grs.		
Malla	% retenido	Retenido en (peso) grs.
4	0	0
10	42.35	55.06
20	21.18	27.53
40	10.59	13.76
60	5.88	7.65
100	5.88	7.65
200	5.88	7.65
charola	8.24	10.71

Tabla 28 Resultados de la prueba "Equivalente de arena"

material de banco	lectura de arena	lectura de arcilla	E. de arena en %
Cerritos	3.9	4.78	81.59
AGC	3.63	4.62	78.57
Caliza	3.85	5	77.00
Arcilla	3.8	5.55	68.47
Cal	3.6	5.15	69.90
Cemento	3.45	4.55	75.82

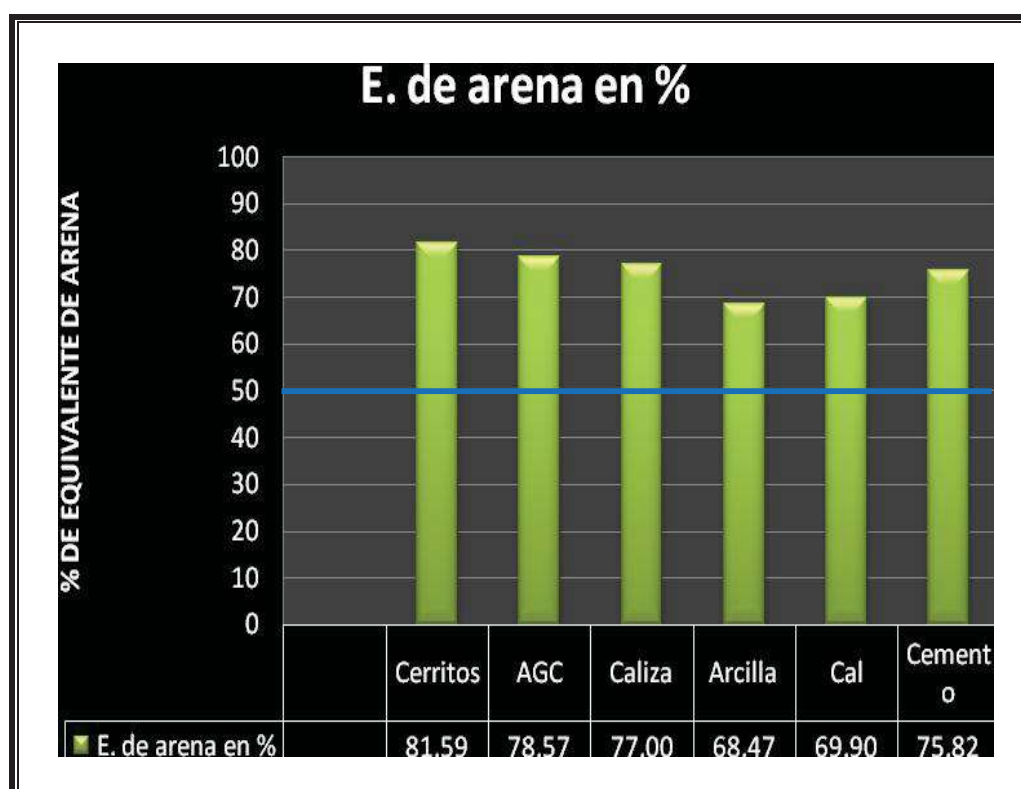


FIGURA 24 Resultados de la prueba de "Equivalente de arena.

En la figura 24 podemos observar claramente que todos los tipos de filler cumplen con el "Equivalente de arena" mínimo igual a 50% marcado por la norma N-CMT-4-04/08, para materiales pétreos empleados en la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría densa y para mezclas asfálticas de granulometría abierta. Incluso en algunos casos muy por encima del mínimo.

6.4.- Agregados pétreos para la fabricación de las probetas para el Método UCL®.

El banco del que obtuvimos las 2 fracciones para la fabricación de las probetas Marshall, es el banco AGC, ubicado en la salida a Salamanca. Como se mencionó anteriormente una fracción está comprendida entre las mallas No. 4 y la No. 8 y la segunda fracción está comprendida entre las mallas No. 8 y la No.30, ya que estas son las más cercanas a las medidas (5mm a 2.5mm y 2.5mm a 0.63mm), que se especifican en el Método UCL®.



FIGURA 25 Ubicación del Banco AGC.



FIGURA 26 Muestreo y recolección de material pétreo.

Una vez que se trajo el material del banco se cribó haciéndolo pasar por las mallas antes mencionadas, desechando el material que se retiene en la malla No. 4 y el que pasa la malla No. 30, Es decir solo aprovechamos el material que se retiene en la Malla No. 8 para la fracción gruesa y el que se retiene en la malla No. 30 para la fracción fina. Mientras se criba el material se deposita en costales los cuales se cierran y se guardan en un lugar donde no se vuelva a contaminar con materia orgánica o con polvo que se pueda desprender durante el cribado. En las tablas 29 y 30 se muestran los cálculos para obtener la cantidad de material a cribar para elaborar las pastillas Marshall a ensayar, se considera esta cantidad de material lavado y seco.



FIGURA 27 Cribado de material pétreo.

Tabla 29 Cantidad total de probetas a fabricar

Factor	No. De probetas	No. De filleres	No. De temperaturas	Total
Temperatura	3	6	6	108
Humedad	3	6	4	72
Envejecimiento	3	6	5	90
Total				270

Tabla 30 Cuantificación de material pétreo para las fracciones (gruesa y fina).

Fracción de material (Malla)	Peso total de la muestra (kg)	% de material	Total de material en peso(kg)	Total de material para todas las probetas (kg)
No. 4 a No.8	0.9	80	0.72	194.4
No.8 a No.30	0.9	20	0.18	48.6

Para fabricar las probetas se cribaron 243 kg de material pétreo, el mismo que se lavó. Se condicionó un lugar en el laboratorio para tenderlo al sol como se muestra en la figura 28 para secarlo y así limpiarlo de los finos y materia orgánica que pudieran alterar los resultados.



FIGURA 28 Lavado, tendido y secado del material pétreo.

Una vez lavado todo el material tanto de la fracción gruesa como de la fina se procedió a preparar las muestras del material pétreo para fabricar las probetas Marshall, como se menciona anteriormente las probetas pesan 900 gr de los cuales el 80% (720 g) son del material pétreo retenido en la malla No. 8, y el 20 % (180 g) es del material retenido en la malla No. 30, además de que le vamos agregar 25 g de filler (pasa malla No. 200).

Por otro lado utilizamos asfalto tipo AC-20 procedente de la refinería de Salamanca el cual fue proporcionado por dos empresas, uno de los asfaltos es procedente del lote de la empresa SIOBI y el otro es del lote del Grupo de Oro, Como la cantidad de asfalto es un porcentaje del material pétreo (4.5%) se utilizaron aproximadamente 41gr por probeta dando un total aproximado de 11.070 Kg en total para nuestras 270 probetas.

6.5.- Fabricación de probetas tipo Marshall.

Para este trabajo de investigación se fabricaron 270 probetas, de las cuales 108 son para analizar por susceptibilidad térmica, 72 para análisis por susceptibilidad a la humedad y las 90 restantes para el análisis por susceptibilidad al envejecimiento.

El procedimiento para la fabricación de las probetas Marshall es el siguiente:

1. Se coloca el material pétreo en charolas y junto con los moldes para la fabricación de las probetas se introducen al horno eléctrico de ventilación forzada a una temperatura de 160°C durante 24 h como se muestra en las figuras 29 y 30. Para que el material quede completamente seco y los moldes se encuentren calientes a la hora de fabricar las probetas y así evitar que se le adhiera la mezcla asfáltica a los moldes durante el proceso de fabricación y compactación.



FIGURA 29 Charolas y moldes para la fabricación de las probetas Marshall.



FIGURA 30 Acomodo de charolas y moldes dentro del horno eléctrico de ventilación forzada.

2. Al día siguiente, 4 h antes de que se cumplan las 24 h de haber metido el material pétreo en el horno eléctrico de ventilación forzada, debemos agregarle a cada una de las charolas los 25 g de filler y meter el asfalto al horno para que éste se haga lo suficientemente líquido y sea más fácil integrar el asfalto con los agregados para fabricar la mezcla asfáltica. Es importante mencionar que el tiempo de 4 h es para asegurarnos de que el asfalto sea lo suficientemente líquido y también para que el filler pierda la humedad y se encuentre a una temperatura adecuada, porque de lo contrario es más difícil integrarlos.



FIGURA 31 Material pétreo después del pre-condicionamiento en el horno.

3. Preparamos el material para la fabricación de las probetas Marshall
 - Se preparan las bases de papel del mismo diámetro que el interior del molde (2 por probeta), las cuales ya deben estar elaboradas con anticipación a la fabricación de las probetas.
 - Colocamos y encendemos la báscula electrónica, la cual ponemos en ceros para que esté lista a la hora de comenzar a pesar.



FIGURA 32 Báscula electrónica.

- Encendemos la parrilla donde vamos a integrar el material pétreo con el asfalto.
- Instalamos y programamos el contador de la máquina compactadora Marshall en 50 golpes, conectando la máquina compactadora Marshall al contador para que éste se pare automáticamente cuando se cumplan los 50 golpes.



FIGURA 33 Contador del compactador Marshall

4. Ya que se han cumplido las 24 h de haber metido el material pétreo y de que se cumplieron las 4 h de pre-acondicionamiento del asfalto y del filler, una vez que tenemos todo el equipo para fabricar las probetas Marshall, ponemos en ceros la báscula para destazar la charola con el material y después integrarle al material pétreo 41 g de asfalto como se muestra en la figura 34.



FIGURA 34 Material pétreo después del pre-condicionamiento en el horno y con el asfalto listo para comenzar a mezclarlo

5. Una vez que se coloca el asfalto en la charola junto con el material pétreo se procede a mezclarlo con una espátula para esto se integra con ayuda de una estufa para mantener la temperatura que tenían los pétreos y el asfalto en el horno como se muestra en la figura 34.
6. Ya que se tiene la mezcla bien homogénea, se prepara el molde en el que va a ser vertida la mezcla, siguiendo los siguientes pasos:
 - Primero se saca del horno el molde (base, molde y collarín) figura No. 29
 - Se arma la pieza que necesitamos para colocar la mezcla y compactarla , colocando primero la base, después el molde y por último el collarín,
 - Antes de vaciar la mezcla en el molde ya formado, colocamos uno de los papeles en la base del molde para evitar que la mezcla asfáltica se adhiera a la base del molde.
7. Una vez que se le colocó el papel en la base del molde se vierte la mezcla asfáltica con ayuda de un embudo, haciendo lo más rápido posible el vertido de la mezcla en el molde y así evitar que la mezcla pierda temperatura y por lo tanto sea más difícil compactarla, al verterla debemos tener cuidado de no verterla fuera del molde.
8. Una vez que se ha vertido la mezcla en el molde retiramos el embudo revisando que este no traiga mezcla adherida, si es el caso lo limpiamos. Para que no haya alteración de resultados.

9. Después de retirar el embudo, se agita de un lado a otro el molde para que la mezcla se distribuya uniformemente en el molde y así evitar que la probeta una vez compactada quede deforme por el mal acomodo de la mezcla en el molde y se le coloca el otro papel sobre la mezcla para evitar que se le pegue a la base del pisón de la Máquina compactadora.
10. Una vez que la mezcla esta dentro del molde, se traslada el molde con cuidado hasta la Máquina compactadora Marshall, colocándolo en la base de ésta, se debe tener cuidado de que el molde quede bien centrado en la máquina como se muestra en la figura 35.



FIGURA 35 Molde centrado en el compactador Marshall.

11. Después se coloca el pisón de la máquina, se coloca el contrapeso y el seguro al pisón en su parte superior para evitar que durante la compactación éste se vaya a salir, tal como se muestra en la figura 36.



FIGURA 36 Compactación de probeta Marshall.

12. Se compacta la mezcla, se le dan 50 golpes con el pisón en la Máquina compactadora, una vez pasados los 50 golpes, se retira el molde de la Máquina y con mucho cuidado se le da vuelta al molde teniendo cuidado de que no se salga la mezcla.
13. Acomodado nuevamente el molde en la Máquina compactadora, se le dan a la otra cara de la probeta los otros 50 golpes restantes, para completar el ciclo de compactación.
14. Retiramos de la Máquina el contrapeso, el seguro y el pisón, para poder retirar el molde con la probeta terminada de la Máquina compactadora.
15. Después se desarma el molde, regresando el collarín y la base al horno para que nuevamente se calienten.
16. Debemos retirar las bases de papel de la probeta aprovechando que aun está caliente y de esta manera es más fácil ya que si dejamos que se enfríe, el papel se adhiere totalmente a la probeta y es muy difícil retirarlo, como se muestra en la figura 37.



FIGURA 37 Retiro de la base de papel que se utilizó para evitar que se adhiriera mezcla a la base del molde y al pisón.

17. Se deja enfriar el molde con la probeta, aproximadamente 1 ó 2 horas.



FIGURA 38 Proceso de enfriamiento de probetas.

18. Por último se desmonta la probeta del molde con ayuda de un pisón y un collarín, colocando el collarín debajo del molde y con ayuda del pisón, se golpea ligeramente la probeta hasta que salga del molde para que quede como en la figura 39.

19. Para la fabricación de las otras probetas se repiten los pasos del 3 al 18, para cada una de las probetas.

20. Una vez que hemos terminado la serie de probetas procedemos a marcarlas de acuerdo al filler empleado para su fabricación, como se muestra en la figura 39.



FIGURA 39 Identificación y marcado de las probetas.

21. Después de concluida la fabricación de la serie de probetas, debemos limpiar el equipo utilizando, para esto usamos estopa con gasolina para remover el material adherido al equipo.

6.6.-Pre-acondicionamiento de las pastillas Marshall para la susceptibilidad a la humedad y envejecimiento.

Es importante mencionar que los tres factores a analizar (temperatura, humedad y envejecimiento), necesitan que las probetas Marshall tengan un pre-acondicionamiento antes de la prueba del ensayo cántabro, las que se van a analizar para susceptibilidad térmica solo necesitan un pre-acondicionamiento de 4 h antes del ensaye a diferencia de las que van a estar sometidas a envejecimiento y humedad, este proceso lo explicamos a continuación.

6.6.1.-Pre-condicionamiento para susceptibilidad a la humedad de las probetas.

Una vez que se ha terminado de fabricar todas las probetas que necesitamos para realizar el Ensayo Cántabro de pérdidas por desgaste, para someterlas bajo las condiciones de los tres factores mencionados anteriormente. Primero vamos a someterlas a la humedad, para esto preparamos 72 probetas para meterlas al baño maría en dos rondas de 36 por cada una durante 24 hr. El procedimiento es el siguiente:

- Preparamos el material necesario para la llevar a cabo el pre-acondicionamiento.

- Se lava la Máquina para el Baño Marshall con que cuenta el laboratorio de materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, para eliminar el polvo o cualquier partícula o residuo que pueda tener de los ensayos anteriores. Como se muestra en la figura 40.



FIGURA 40 Máquina para Baño María ó Baño Marshall, con que se cuenta en el laboratorio "Ing. Luis Silva Ruelas" de la facultad de Ing. Civil de la U.M.S.N.H.



FIGURA 41 Máquina llena de agua para que esta adquiera la temperatura de 60°C antes de introducir las probetas Marshall.

- Se enciende y se calibra la Máquina a una temperatura de $60 \pm 2^\circ\text{C}$.
- Mientras que la Máquina alcanza la temperatura, debemos organizar las probetas de acuerdo al tipo de filler de que se trata, y hacer en papel un croquis y anotar en el orden que le corresponde a cada tipo de filler, para que al sacar las probetas

podamos identificar el tipo de filler del que se trata, ya que con el agua caliente se le puede borrar la marca.

- Una vez que ha alcanzado la temperatura, se introducen las 36 probetas en la máquina en 2 camas de probetas, para esto se tuvo que adaptar una parrilla más ya que la Máquina de Baño Marshall solo cuenta con una. Para esto utilizamos dos de las parrillas del horno con que cuenta el laboratorio de asfaltos, y con ayuda de 6 tramos de alambre recocido adaptamos la segunda parrilla para colocar en la segunda cama otras 18 probetas y acelerar el proceso de pre-acondicionamiento y se anota a qué hora se introdujeron.



FIGURA 42 Probetas Marshall después de las 24 hr en baño María y también se muestra la parrilla que se acondiciono para meter una segunda cama de probetas al Baño María.

- Una vez pasadas 24 h exactas se sacan las probetas en orden, cuidando sacar las tres probetas juntas de cada tipo de filler y marcándolas nuevamente para saber de qué tipo de filler se trata.
- Después se secan superficialmente con un trapo, las trasladamos a un lugar seco y ahí se dejan escurrir durante otras 24 horas para que se les salga el exceso de agua y se sequen. Para posteriormente probarlas a cada una de las siguientes temperaturas -15, 5, 25, 40, 55 y 70°C.

6.6.2.-Pre-acondicionamiento de susceptibilidad al envejecimiento de las probetas.

Después de terminar de fabricar las probetas Marshall, procedemos a darle pre-condicionamiento a 90 probetas las cuales vamos utilizar para realizar el análisis por envejecimiento el cual tendrá una duración de 32 h, y el procedimiento es el siguiente:

- 1) Primero se prepara, calibra y acondiciona el horno que es necesario para llevar a cabo el pre-acondicionamiento de las probetas.
- 2) Se cortan las mallas y los alambres que sirven para envolver y proteger a las probetas Marshall.
 - Primero se cortan 2 bases de 11 X 11 cm para cada una de las probetas con ayuda de unas tijeras especiales, lo que quiere decir que para 90 probetas se requieren 180 bases, las cuales son de alambre galvanizado de 3/8 X 3/8" de pulgada como se observa en la figura 43.



FIGURA 43 Proceso de corte y obtención de las mallas para proteger las probetas cuando sean sometidas al envejecimiento en el horno eléctrico de ventilación forzada.

- Después se cortan mallas de mosquitero de sección rectangular de 6 X 35 cm (de alambre galvanizado), una por cada probeta lo que quiere decir que necesitamos cortar 90 mallas para cubrir y proteger nuestras probetas.
- El siguiente paso es cortar tramos de alambre recocado de 40 cm aproximadamente para sujetar las mallas rectangulares en la probeta con ayuda de unas pinzas para cortar alambre, para cada una de las probetas son dos alambres lo que quiere decir que se necesitan 180 tramos de alambre recocado para nuestras 90 probetas. Tal como se muestra en la figura 44.
- Después se deben cortar otros 180 tramos de alambre recocado de aproximadamente 45 cm de longitud para sujetar las bases de malla galvanizada a la probeta, ya que se tienen 90 probetas y son dos por probeta.

- Una vez que se han cortado las mallas y los alambres, el siguiente paso es amarrar la malla rectangular a lo largo de la circunferencia de la probeta como se muestra en las figura 44 y 45.

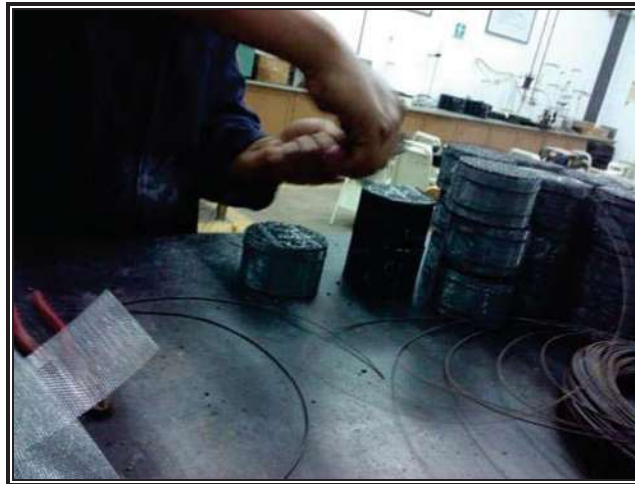


FIGURA 44 Colocación y sujeción de la malla a lo largo de la circunferencia de la probeta.

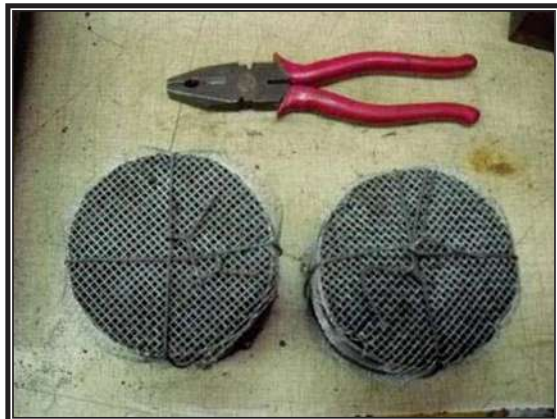


FIGURA 45 Vista de la probeta una vez que se le ha colocado la malla en las caras planas de la probeta.

- 3) Se colocan las bases de malla galvanizada y se sujetan con ayuda de dos alambres recocidos y unas pinzas para cortar y amarrar alambre, la probeta al final debe quedar cubierta y protegida de la siguiente manera como se muestra en la figura 45.
- 4) Una vez que se les ha dado la preparación adecuada a las probetas, para evitar que al estar a 165°C, haya deformaciones en las probetas o que el asfalto se vuelva tan

líquido provocando pérdidas de asfalto en la probeta. Debemos calibrar el horno a $165^{\circ}\text{C} \pm 1$.

- 5) Después de que el horno alcance la temperatura de 165°C y que esta no varíe entonces se introducen todas las probetas, y cada 2 horas se voltean las probetas para evitar que haya pérdidas de asfalto en la probeta. El proceso de envejecimiento comienza a las 8:00 am y se lleva a cabo en 4 rondas las cuales tienen una duración total de 32 hr y el proceso lo explicamos a continuación.
- 6) El horno consta de dos parrillas para acomodar las probetas, para lo cual a cada una se le acomodan 24 probetas para de esta manera poder realizar el acondicionamiento en 4 rondas, en la primer ronda se acomodan en una parrilla 6 tipos de filler que van a tener 32 hr de envejecimiento y 2 tipos de filler que van a tener 8 hr de envejecimiento, en la segunda parrilla se acomodan 2 tipos de filler que van a tener 8 hr de envejecimiento y 6 tipos de filler que van a tener 2 hr de envejecimiento como se muestra en la figura 46 para que así se cumpla la primer ronda.

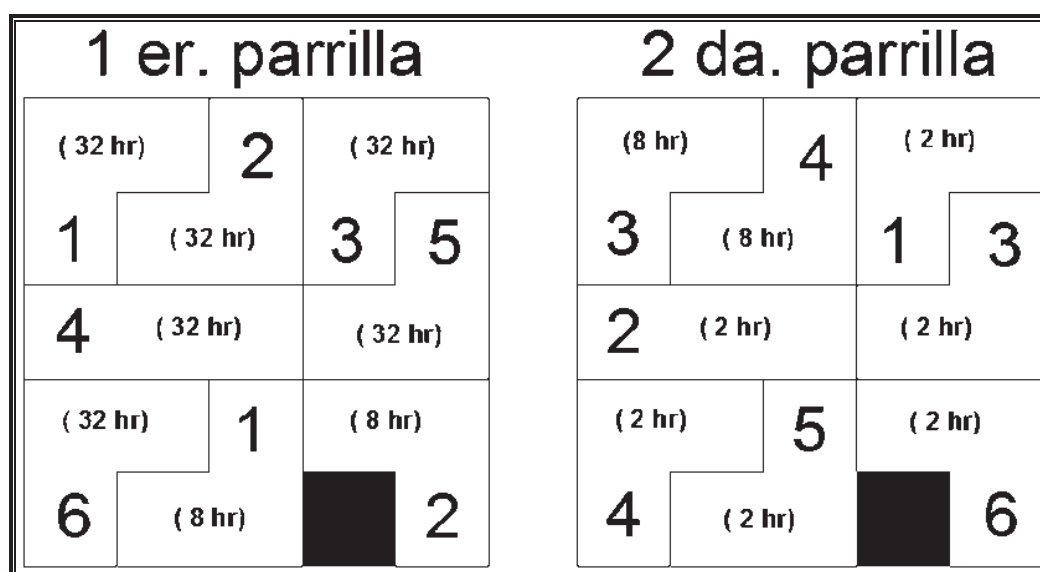


FIGURA 46 Acomodo de las pastillas en las parrillas del horno para llevar a cabo la primera ronda de envejecimiento.

- 7) Transcurridas 2 h de envejecimiento se sacan las probetas sometidas a 2 h de envejecimiento que se encuentran en la segunda parrilla de la primera ronda y se meten en el lugar de estas las probetas que se van a envejecer a 4 h conservando y dándole la vuelta a las probetas a 32 h y 8 h de la primera parrilla y a las de 8 h de la segunda parrilla. Para que se cumpla con la segunda ronda. Figura 47.

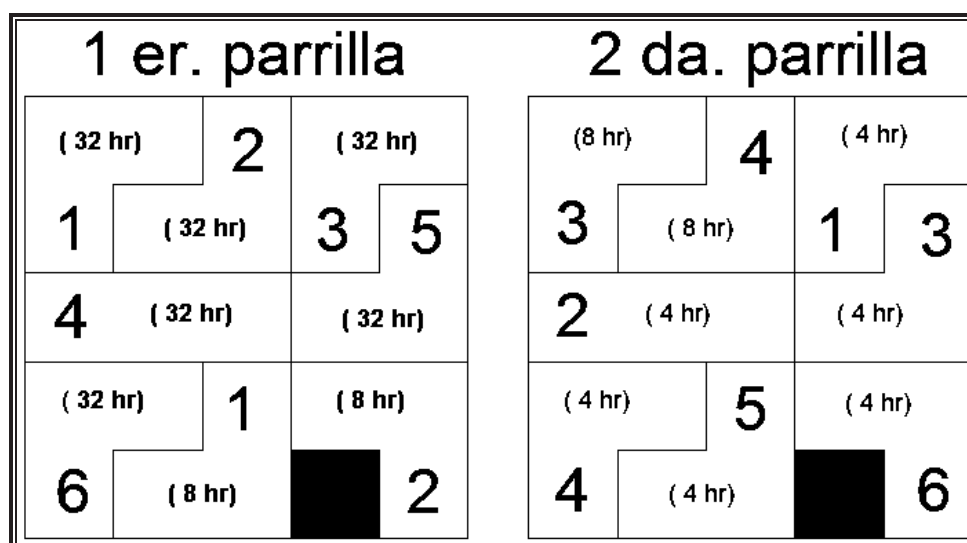


FIGURA 47 En la segunda ronda se conservan todas las probetas de la 1er parrilla y las probetas sometidas a 8 hr de envejecimiento de la 2da parrilla y solo se sustituyen las probetas sometidas a 2 hr por otras probetas sometidas a 4 hr de envejecimiento.

- 8) Transcurridas 4 hr después de haber iniciado la segunda ronda se sacan las probetas sometidas a 4 hr de envejecimiento de la segunda parrilla, y se sustituyen por probetas que van a ser sometidas a 16 hr de envejecimiento y se voltean las probetas a 32 y a 8 hr de envejecimiento que están en la primera parrilla para que se cumpla la tercera ronda. Figura 48.

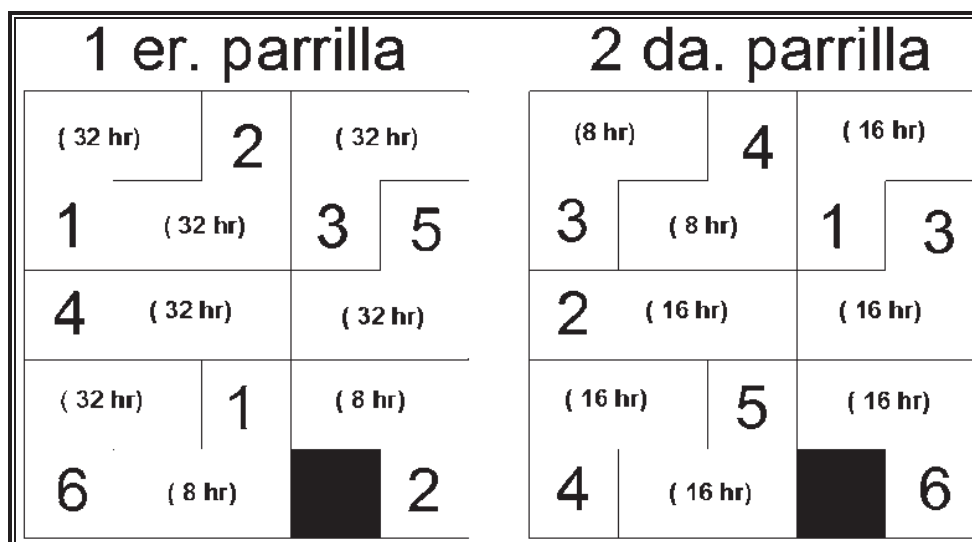


FIGURA 48 Tercer ronda, se conservan las probetas de la primer parrilla y solo se les da vuelta, de la segunda parrilla se conservan las probetas a 8 hrs de envejecimiento y se les da vuelta. Se sustituyen las probetas de 4 hr por las de 16 hr de envejecimiento.

- 9) Cuarta ronda, por último pasadas otras 2 horas se sacan los 2 tipos de filler a 8 hr de envejecimiento que están en la primera parrilla y los 2 tipos de filler a 8 hr de envejecimiento que están en la segunda parrilla y se meten al horno los dos tipos de filler a 8 hr de envejecimiento restantes en la segunda parrilla y de aquí en adelante solo se les da vuelta a las probetas hasta que se cumplan con el tiempo de envejecimiento. Figura 49.

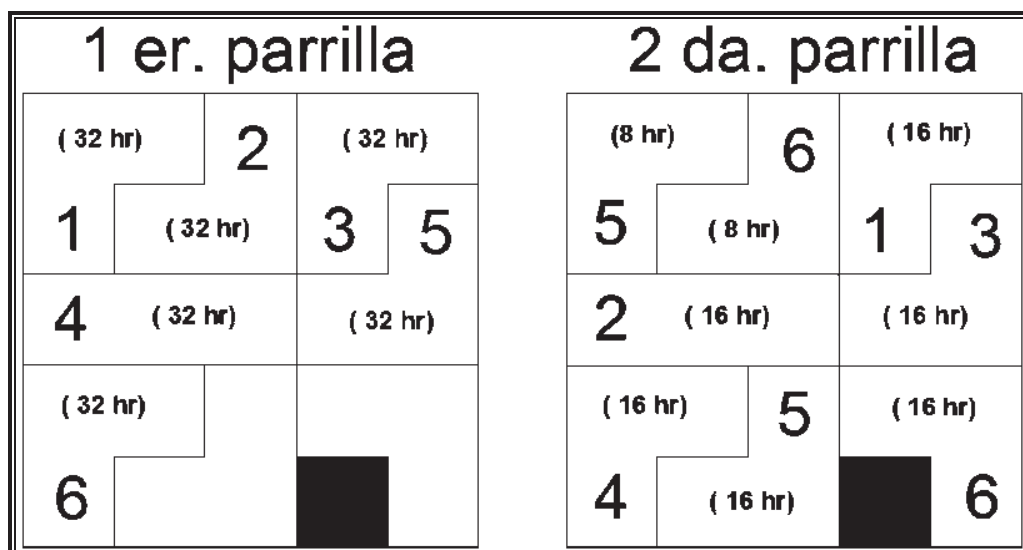


FIGURA 49 Cuarta ronda de envejecimiento



FIGURA 50 Vista de las probetas en las parrillas del horno para someterlas al envejecimiento.

Tabla 31 Proceso de envejecimiento de las probetas Marshall

Ronda No.	No. de grupo de probeta.	No de parrilla	Hora	Horas de envejecimiento	Fecha de inicio	Hora de introducción al horno	Fecha de salida	Hora de salida del horno
1	1 a 6	1	08:00 a.m.	32 hr	11-sep-10	08:00 a.m.	12-sep-10	16:00 p.m.
	1 a 2	1		8 hr	11-sep-10	08:00 a.m.	11-sep-10	16:00 p.m.
	3 a 4	2		8 hr	11-sep-10	08:00 a.m.	11-sep-10	16:00 p.m.
	1 a 6	2		2 hr	11-sep-10	08:00 a.m.	11-sep-10	10:00 a.m.
2	3 a 4 mantiene	2	10:00 p.m.	8 hr	11-sep-10	08:00 a.m.	11-sep-10	16:00 p.m.
	1 a 6	2		4 hr	11-sep-10	10:00 a.m.	11-sep-10	14:00 p.m.
3	3 a 4 mantiene	2	14:00 p.m.	8 hr	11-sep-10	08:00 a.m.	11-sep-10	16:00 p.m.
	1 a 6	2		16 hr	11-sep-10	02:00 p.m.	12-sep-10	18:00 p.m.
4	1 a 6 se mantiene	1	16:00 p.m.	32 hr	11-sep-10	08:00 a.m.	12-sep-10	16:00 p.m.
	5 a 6	2		8 hr	11-sep-10	04:00 p.m.	12-sep-10	12:00 a.m.

En la tabla 33 se muestra que el pre-acondicionamiento de las probetas se termina a las 18:00 hr del día 12 de septiembre de 2010, 32 horas después de haber comenzado el envejecimiento.

10. Cuando las probetas han cumplido el tiempo de envejecimiento correspondiente (2, 4, 8, 16 y 32 horas), y que se han enfriado, lo que prosigue es retirarles la malla a las probetas y marcarlas de acuerdo al tiempo de envejecimiento.

6.7.-Procedimiento de susceptibilidad térmica y descripción de la prueba de desgaste.

Debemos mencionar que el único pre-acondicionamiento que se les debe de dar a las probetas que van a ser analizadas para susceptibilidad térmica es meterlas al horno o al congelador 4 hr, antes de ser probadas, y se debe meter cuatro horas para cada temperatura de análisis. Este mismo pre-acondicionamiento se le da a las probetas que ya han sido pre-acondicionadas para el análisis por humedad, adicional al Baño María. Y el procedimiento de la prueba de desgaste es el mismo para los tres factores a analizar (temperatura, humedad y envejecimiento).

Una vez que terminamos de fabricar las probetas Marshall de los 6 tipos de filler que se van a analizar para la prueba de susceptibilidad térmica, se procede a preparar 18 probetas, 3 de cada tipo de filler, de la siguiente manera:

- 1) Se prepara el equipo.
 - a) Se calibra el horno a la temperatura deseada para el pre-acondicionamiento de las probetas a (40, 55 y/o 70°C), para la temperatura de 25°C las probetas se probarán a temperatura ambiente para cumplir esta parte de la prueba. El pre-

acondicionamiento debe durar al menos 4hr a la temperatura deseada, antes de probar las pastillas.

- b) La Máquina de los Ángeles no tiene instalado un contador o algo que nos indique que ya se cumplieron las 300 revoluciones, es por eso que se le adaptó el contador de la Máquina Compactadora Marshall, para hacer la labor más fácil y así evitar errores que puedan repercutir en los resultados, pero aun se debe corroborar que la máquina gire a 32 revoluciones, por esta razón se calibró la Máquina, se observó que las 300 revoluciones las da en aproximadamente 9 minutos 22.5 segundos.



FIGURA 51 Vista de la Máquina de los Ángeles con el contador de la Máquina Marshall.

- c) Se instala la báscula electrónica para conocer los pesos iniciales (P_i) de las probetas al sacarlas del horno o del refrigerador antes de ser introducidas a la Máquina de los Ángeles para probarlas y también para después de probarlas obtener el peso final (P_f) de las probetas. Como se muestra en la figura 52.

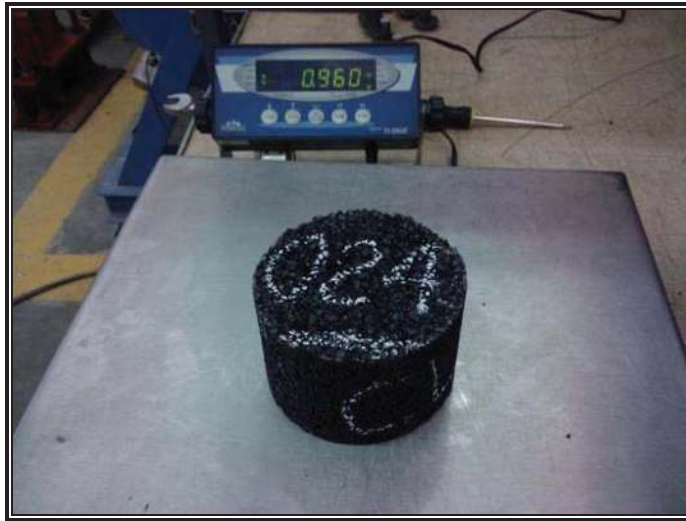


FIGURA 52 Obtención del Peso Inicial (P_i) y el Peso final (P_f) de las probetas con ayuda de la báscula electrónica con aproximación de 1 g.

- 2) Cuando todo el equipo está calibrado, se introducen al horno tres probetas por cada uno de los seis tipos de filler a ensayar, por cada temperatura de análisis.
- 3) Una vez cumplidas las 4 hr de pre-acondicionamiento en el horno a la temperatura de ensaye, se saca la probeta del horno.
- 4) La probeta es pesada rápidamente en la báscula electrónica para obtener el peso inicial (P_i) como se muestra en la figura 52, para que esta no pierda mucha temperatura ya que de bajar mucho la temperatura los resultados obtenidos no serían correctos.
- 5) Después de pesar la probeta, se introduce en la Máquina de los Ángeles, se le coloca la tapa rápidamente y se asegura con los tornillos correspondientes para comenzar la prueba.
- 6) Se detendrá la Máquina de los Ángeles una vez que el contador del compactador Marshall haya contado las 300 revoluciones a las que tiene que someterse la probeta para cumplir el ensayo.
- 7) Cuando se hayan cumplido las 300 vueltas, retiraremos la tapa de la Máquina de los Ángeles y sacaremos la fracción o el trozo más grande que haya quedado de la probeta y se pesará en la báscula analítica para obtener el peso final (P_f).
- 8) Hacemos girar manualmente la Máquina para sacar las partículas y fragmentos que se hayan desprendido de la probeta durante el ensayo.

- 9) Una vez que se hayan ensayado las 18 probetas para la temperatura de 40°C, se calibra nuevamente el horno para la siguiente temperatura de 55°C y luego para 70°C hasta que se hayan probado todas las probetas bajo las tres temperaturas mencionadas anteriormente. Para ensayar todas las probetas repetimos los pasos del 2 al 8 para cada una de las temperaturas.
- 10) Después de terminar de probar las probetas a (40, 55 y 70°C) en el horno procedemos a ensayar las probetas a -15 y 5°C, para comenzar calibramos el congelador a cualquiera de estas dos temperaturas.
- 11) Una vez calibrado el congelador a 5°C, se introducen 3 probetas de cada uno de los diferentes tipos de filler para después probarlas repitiendo los pasos del No. 3 al No. 8 del procedimiento mencionado anteriormente.
- 12) Una vez que han pasado las 4 hr de pre-acondicionamiento en el congelador se comienza a ensayar las probetas.
- 13) Para ensayar las probetas después del pre-acondicionamiento se repiten los pasos del No. 3 al No. 8 del procedimiento mencionado anteriormente.

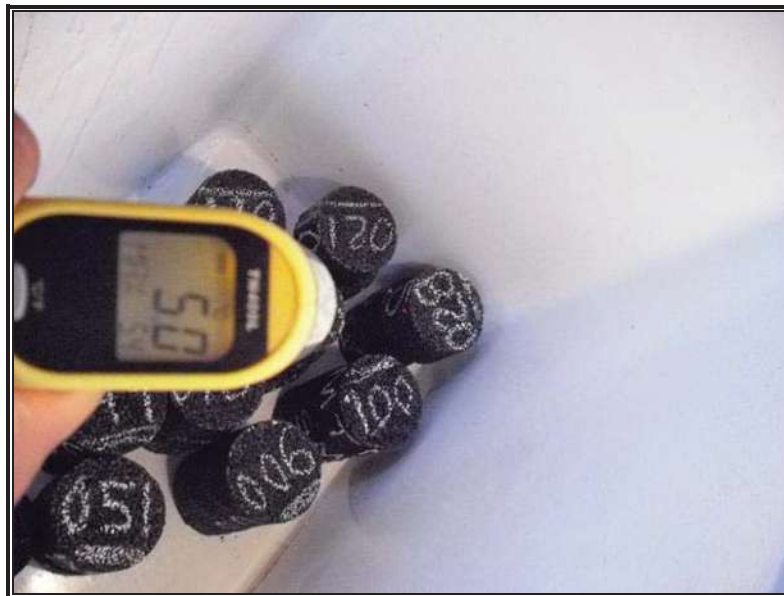


FIGURA 53 Control de temperatura en el congelador.

- 14) Después de ensayar todas las probetas a 5°C se calibra nuevamente el congelador a -15°C y se introducen las probetas de los 6 diferentes tipos de filler durante 4 hr para que cumplan con el pre-acondicionamiento para posteriormente ensayarlas.
- 15) Después de que se cumplen las 4 hr dentro del horno a -15°C, se procede a ensayarlas repitiendo del paso No. 3 al No. 8 del procedimiento mencionado anteriormente.

6.8.-Análisis de resultados.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos en la prueba aplicada a las 18 probetas que se analizaron por temperatura, 12 por humedad y 15 por envejecimiento con su respectiva curva de estado, para cada uno de los diferentes tipos de filler y al final se muestra la gráfica donde se observa el comportamiento de todos los diferentes tipos de filler sometidos a temperatura, humedad y envejecimiento.

Para obtener los resultados se empleó la siguiente fórmula la cual ha sido mencionada en el capítulo 5, en donde las pérdidas están expresadas en (%) porcentaje.

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

Dónde:

(P_d) = Pérdidas por desgaste (%).

(P_i) = Peso inicial (g)

(P_f) = Peso final (g)



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: Arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria (ACIA)

SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA.

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	32	0.959	0.457	52.35	49.55
	16	0.957	0.483	49.53	
	11	0.962	0.512	46.78	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
5°C	4	0.960	0.597	37.81	37.66
	5	0.962	0.601	37.53	
	3	0.959	0.598	37.64	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25°C	21	0.961	0.789	17.90	18.69
	9	0.961	0.795	17.27	
	6	0.952	0.753	20.90	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
40°C	10	0.956	0.804	15.90	12.87
	15	0.956	0.833	12.87	
	20	0.956	0.864	9.62	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	28	0.951	0.849	10.73	9.24
	27	0.955	0.866	9.32	
	29	0.952	0.879	7.67	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	2	0.949	0.611	35.62	51.36
	8	0.949	0.613	35.41	
	14	0.951	0.161	83.07	
Observaciones:					

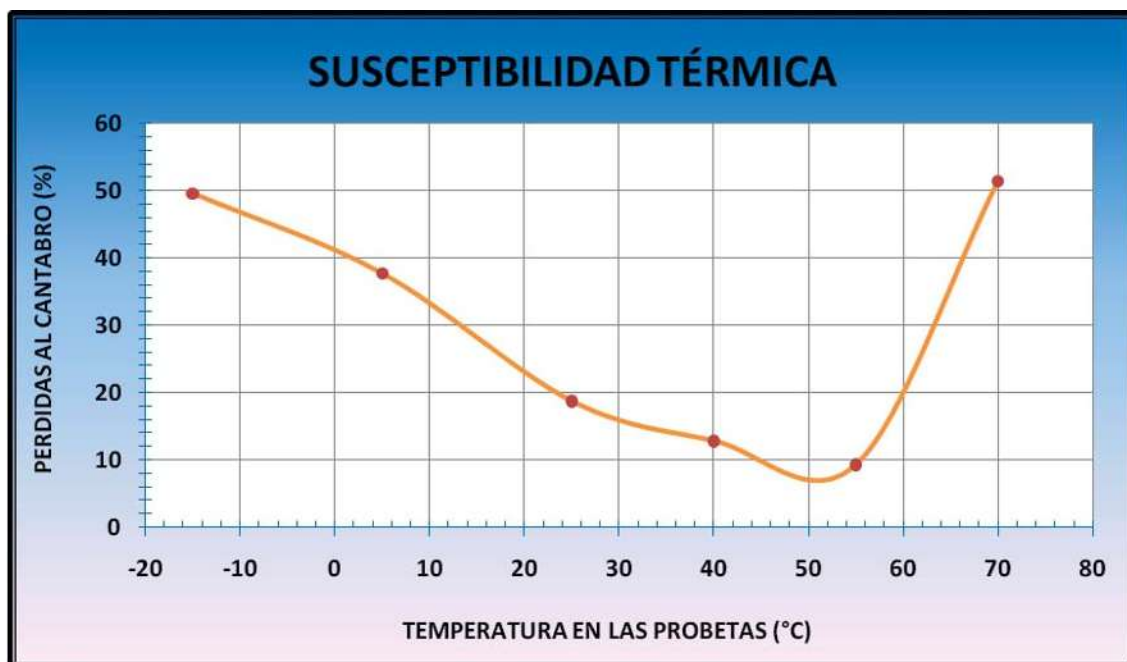


FIGURA 54 Gráfica de resultados del ensayo aplicado para susceptibilidad térmica a la Arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: **Arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria (ACIA)**

SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	1	0.986	0.332	66.33	64.24
	2	0.989	0.368	62.79	
	3	0.989	0.360	63.60	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25 °C	1	0.985	0.312	68.32	72.89
	2	0.984	0.303	69.21	
	3	0.986	0.186	81.14	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	1	0.963	0.205	78.71	80.95
	2	0.967	0.139	85.63	
	3	0.963	0.207	78.50	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	1	0.959	0.151	84.25	86.99
	2	0.962	0.092	90.44	
	3	0.961	0.132	86.26	
Observaciones:					

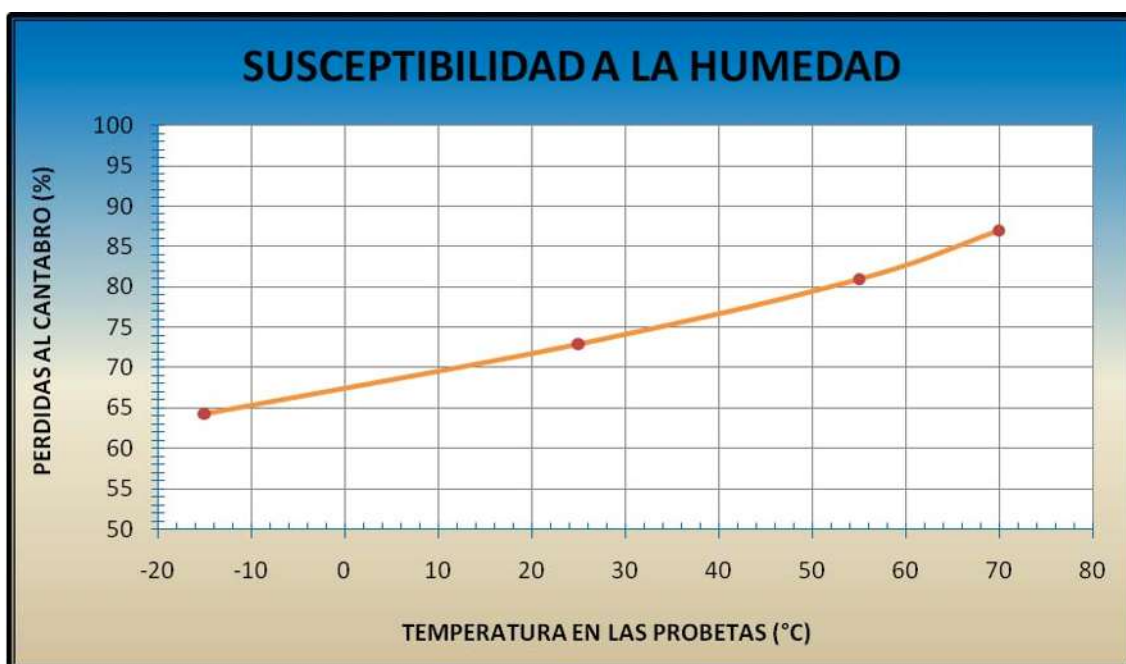


FIGURA 55 Gráfica de los resultados del ensayo para Susceptibilidad a la humedad aplicado a la arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria.

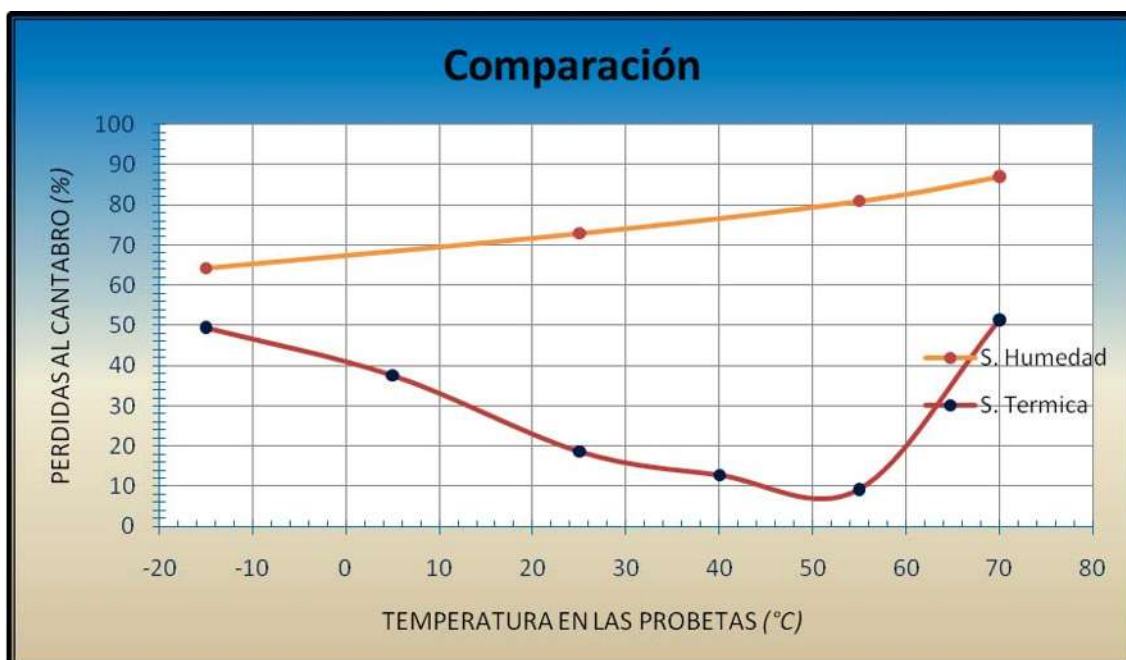


FIGURA 56 Gráfica comparativa de los resultados de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica de los ensayos aplicados a la arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: **Arcilla de las canchas de Ciudad Universitaria (ACIA)**

SUSCEPTIBILIDAD AL ENVEJECIMIENTO

Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
2 Hrs	1	0.962	0.696	27.65	30.26
	2	0.944	0.658	30.30	
	3	0.950	0.638	32.84	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
4 Hrs	1	0.951	0.488	48.69	47.97
	2	0.947	0.472	50.16	
	3	0.950	0.522	45.05	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
8 Hrs	1	0.941	0.460	51.12	48.45
	2	0.940	0.518	44.89	
	3	0.924	0.468	49.35	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
16 Hrs	1	0.943	0.258	72.64	58.80
	2	0.947	0.441	53.43	
	3	0.948	0.471	50.32	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
32 Hrs	1	0.953	0.311	67.37	66.06
	2	0.874	0.317	63.73	
	3	0.960	0.316	67.08	
Observaciones:					

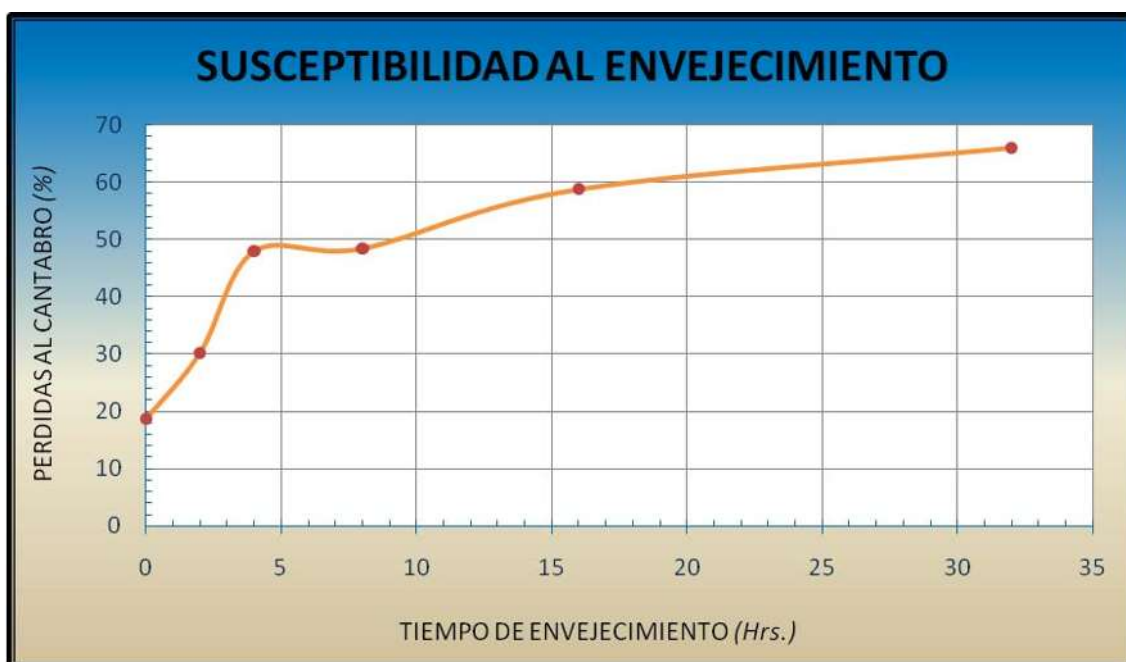


FIGURA 57 Gráfica de resultados del ensayo para susceptibilidad al envejecimiento aplicado a la arcilla de Ciudad Universitaria.

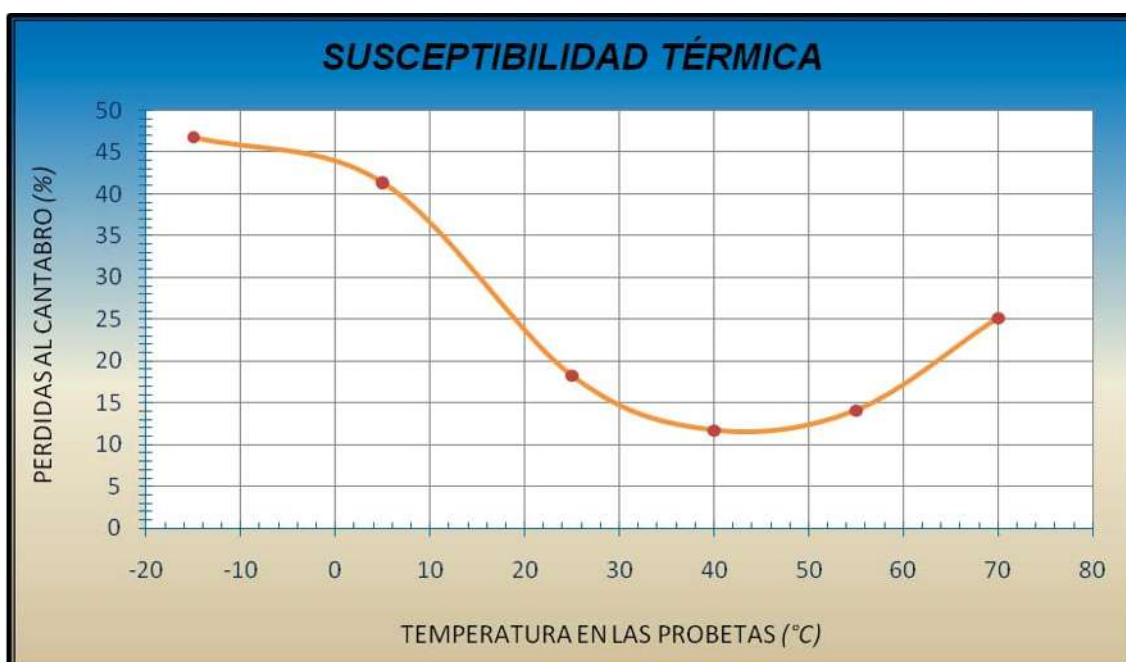


FIGURA 58 Gráfica de resultados del ensayo para susceptibilidad térmica aplicado a las probetas del Banco AGC.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: Banco AGC (AGC)

SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	22	0.959	0.537	44.00	46.76
	30	0.941	0.550	41.55	
	10	0.972	0.440	54.73	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
5°C	51	0.971	0.558	42.53	41.34
	42	0.953	0.587	38.41	
	21	0.956	0.544	43.10	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25°C	6	0.955	0.804	15.81	18.22
	33	0.954	0.799	16.25	
	29	0.903	0.699	22.59	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
40°C	1	0.956	0.865	9.52	11.72
	40	0.969	0.858	11.46	
	13	0.938	0.805	14.18	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	14	0.943	0.833	11.66	14.09
	45	0.950	0.796	16.21	
	50	0.973	0.833	14.39	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	17	0.948	0.739	22.05	25.15
	33	0.949	0.669	29.50	
	8	0.946	0.720	23.89	



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: Banco AGC (AGC)

SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	1	0.987	0.460	53.39	56.61
	2	0.950	0.391	58.84	
	3	0.969	0.411	57.59	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25 °C	1	0.988	0.271	72.57	69.39
	2	0.934	0.261	72.06	
	3	0.993	0.362	63.54	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	1	0.967	0.237	75.49	80.40
	2	0.976	0.134	86.27	
	3	0.973	0.200	79.45	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	1	0.975	0.102	89.54	87.01
	2	0.988	0.135	86.34	
	3	0.748	0.111	85.16	
Observaciones:					

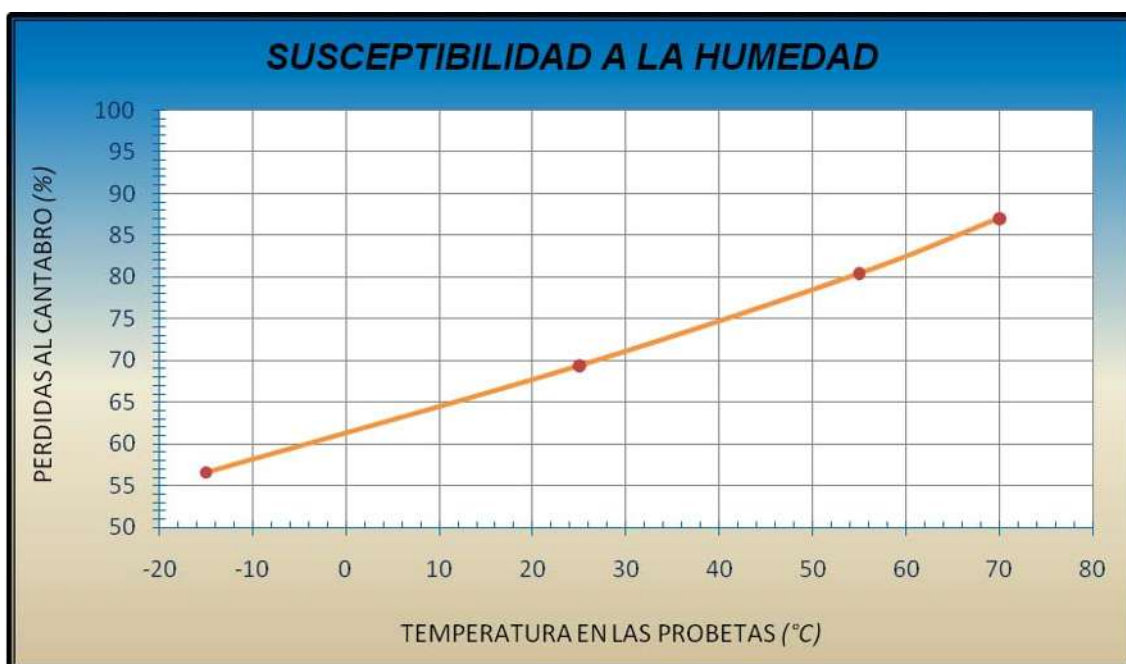


FIGURA 59 Gráfica de resultados del ensayo aplicado a las probetas para susceptibilidad a la humedad.

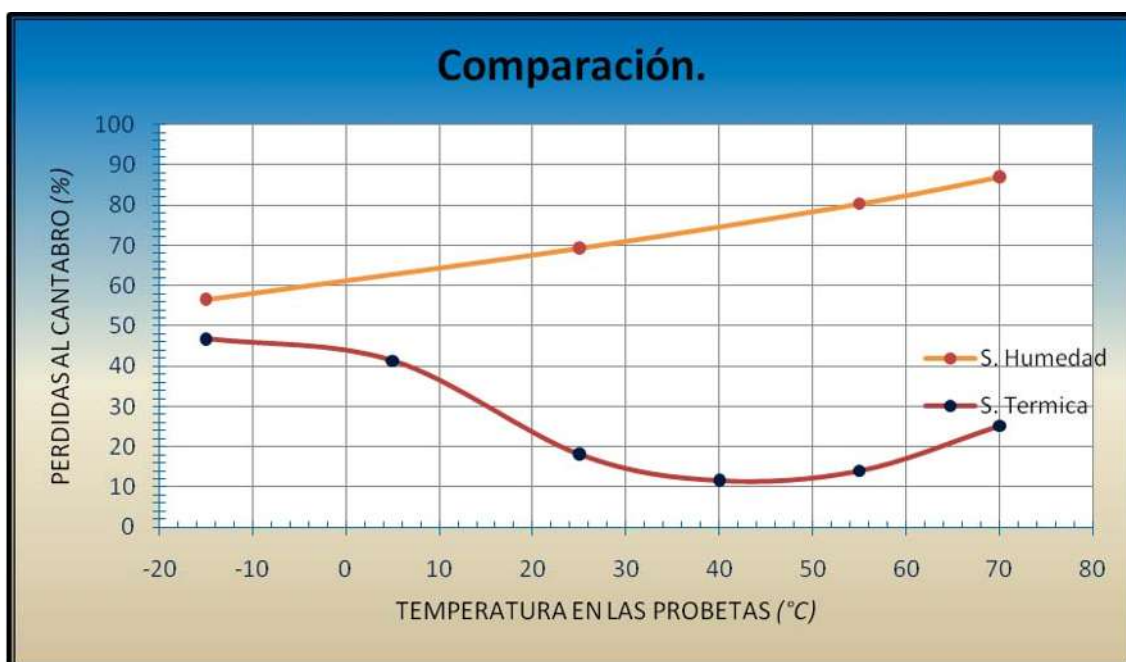


FIGURA 60 Gráfica de comparación de resultados para los ensayos de susceptibilidad térmica y susceptibilidad a la humedad aplicados a las probetas del Banco AGC.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: Banco AGC (AGC)

SUSCEPTIBILIDAD AL ENVEJECIMIENTO

Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
2 Hrs	1	0.951	0.620	34.81	32.36
	2	0.964	0.653	32.26	
	3	0.950	0.665	30.00	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
4 Hrs	1	0.966	0.629	34.89	39.53
	2	0.976	0.605	38.01	
	3	0.972	0.528	45.68	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
8 Hrs	1	0.949	0.465	51.00	51.41
	2	0.943	0.509	46.02	
	3	0.944	0.404	57.20	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
16 Hrs	1	0.963	0.418	56.59	55.10
	2	0.945	0.424	55.13	
	3	0.954	0.443	53.56	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
32 Hrs	1	0.953	0.327	65.69	68.50
	2	0.874	0.251	71.28	
	3	0.960	0.302	68.54	
Observaciones:					



FIGURA 61 Gráfica de resultados del ensayo para susceptibilidad al envejecimiento aplicado a las probetas del Banco AGC.

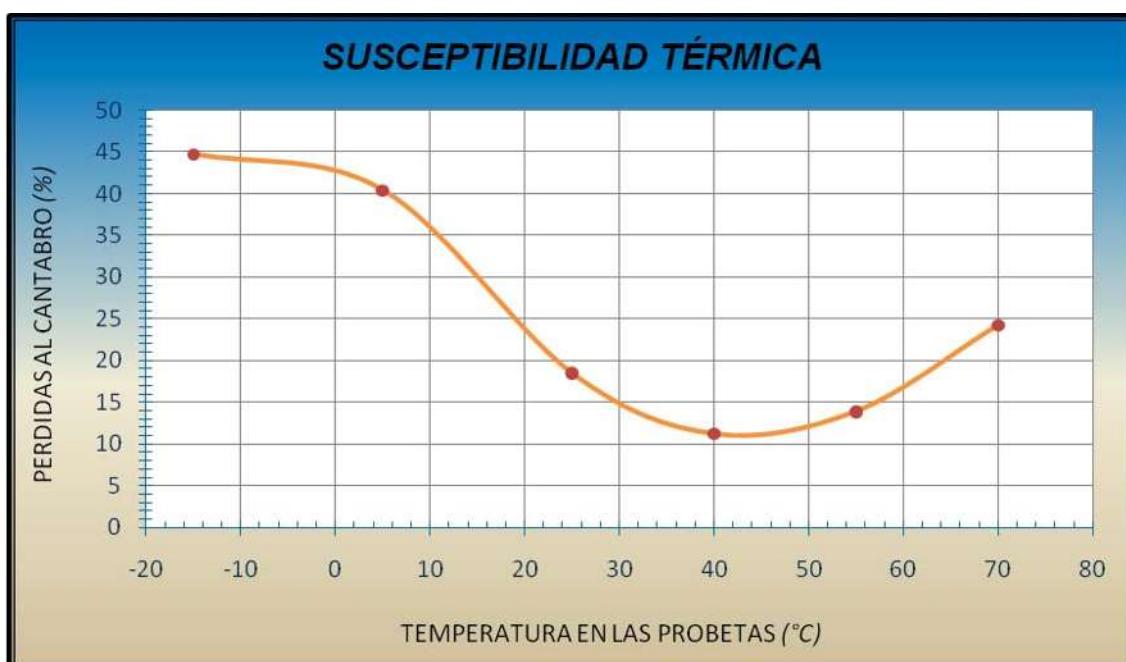


FIGURA 62 Gráfica de resultados del ensayo para susceptibilidad térmica aplicado a las probetas fabricadas con hidróxido de calcio (Cal comercial).



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: Hidróxido de calcio, Cal comercial (CAL)

SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	9	0.947	0.494	47.84	44.72
	3	0.964	0.539	44.09	
	21	0.947	0.547	42.24	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
5°C	14	0.945	0.531	43.81	40.39
	20	0.944	0.594	37.08	
	43	0.948	0.566	40.30	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25°C	17	0.939	0.753	19.81	18.46
	15	0.938	0.756	19.40	
	6	0.964	0.808	16.18	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
40°C	10	0.938	0.838	10.66	11.20
	5	0.947	0.849	10.35	
	2	0.946	0.827	12.58	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	22	0.944	0.813	13.88	13.88
	19	0.951	0.821	13.67	
	7	0.937	0.805	14.09	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	48	0.947	0.706	25.45	24.19
	33	0.946	0.747	21.04	
	11	0.951	0.703	26.08	



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: Hidróxido de calcio, Cal comercial (CAL)

SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	1	0.975	0.450	53.85	57.20
	2	0.979	0.364	62.82	
	3	0.974	0.439	54.93	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25°C	1	0.954	0.451	52.73	52.44
	2	0.974	0.520	46.61	
	3	0.966	0.406	57.97	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	1	0.962	0.489	49.17	24.31
	2	0.959	0.876	8.65	
	3	0.960	0.815	15.10	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	1	0.958	0.173	81.94	81.70
	2	0.964	0.214	77.80	
	3	0.957	0.140	85.37	
Observaciones:					

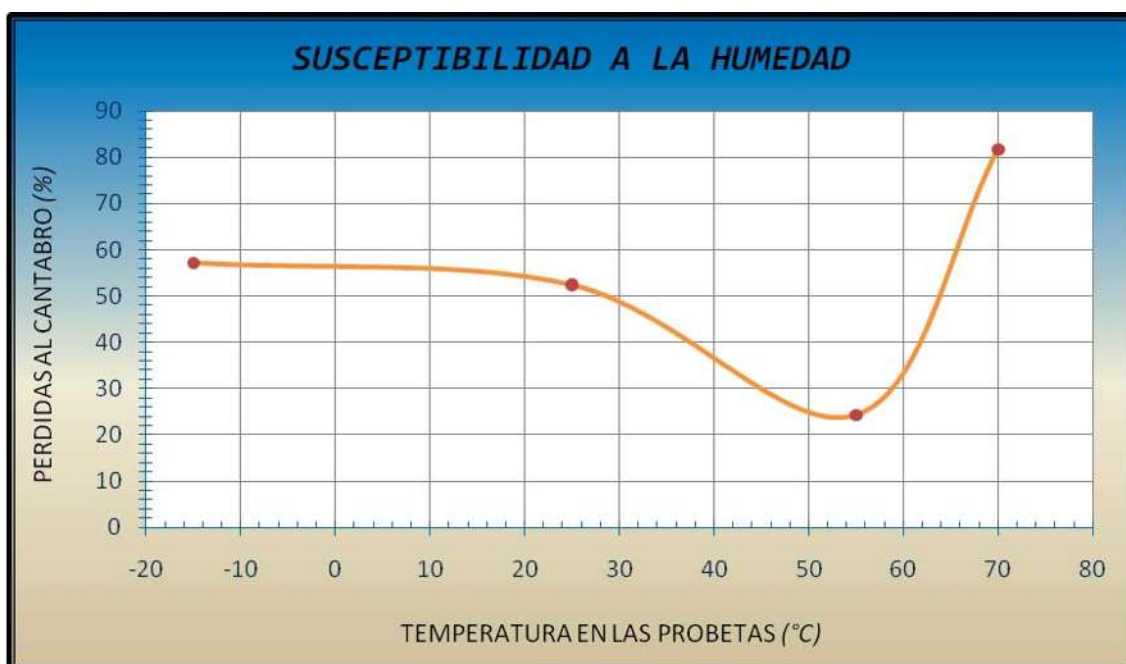


FIGURA 63 Gráfica de resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad aplicado a las probetas elaboradas con Cal comercial.

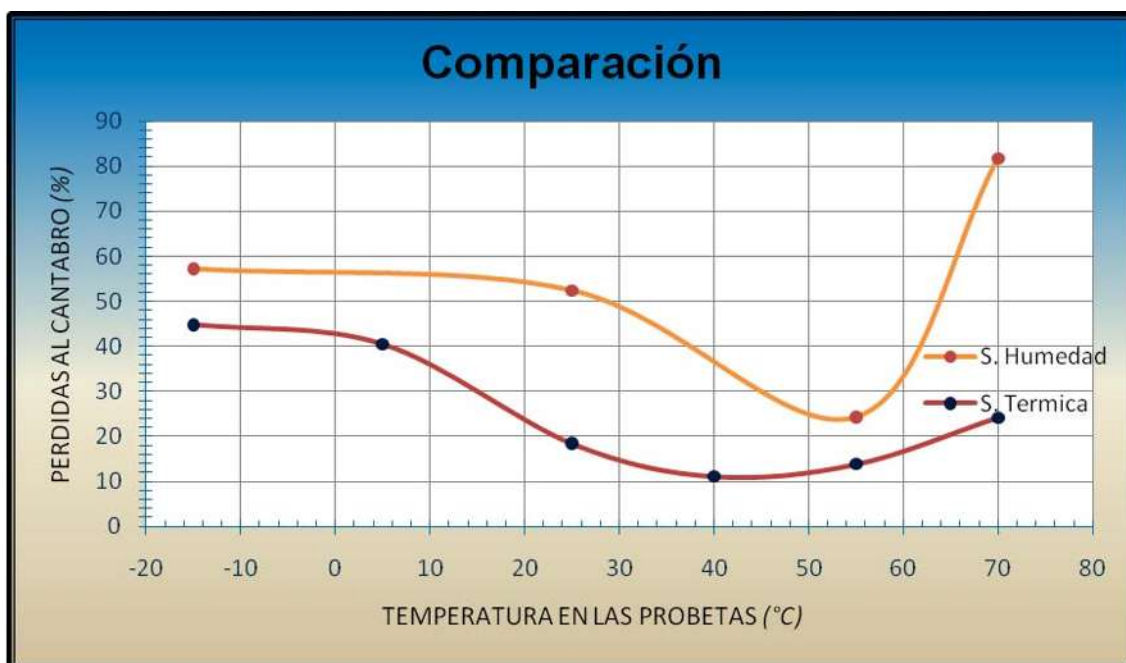


FIGURA 64 Gráfica de resultados de los ensayos de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica aplicados a las probetas elaboradas con Cal comercial.

 UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”	
MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)	

Muestra: Hidróxido de calcio, Cal comercial (CAL)

SUSCEPTIBILIDAD AL ENVEJECIMIENTO

Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
2 Hrs	1	0.936	0.665	28.95	30.93
	2	0.929	0.640	31.11	
	3	0.935	0.629	32.73	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
4 Hrs	1	0.926	0.531	42.66	38.74
	2	0.945	0.614	35.03	
	3	0.937	0.576	38.53	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
8 Hrs	1	0.940	0.561	40.32	39.93
	2	0.936	0.534	42.95	
	3	0.939	0.596	36.53	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
16 Hrs	1	0.930	0.479	48.49	51.32
	2	0.934	0.452	51.61	
	3	0.932	0.430	53.86	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
32 Hrs	1	0.933	0.365	60.88	56.15
	2	0.920	0.411	55.33	
	3	0.930	0.444	52.26	
Observaciones:					



FIGURA 65 Gráfica de resultados del ensayo de susceptibilidad a la humedad aplicado a las probetas elaboradas con Cal comercial.

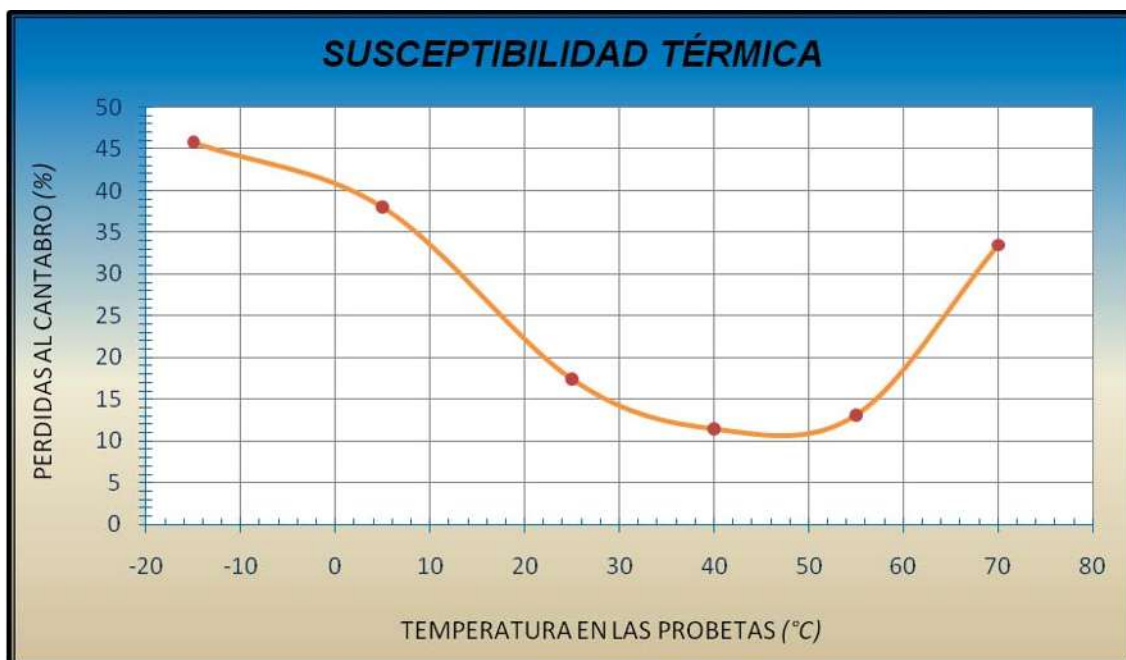


FIGURA 66 Curva de estado del ensayo de susceptibilidad térmica para las probetas elaboradas con Cemento Portland CPC-30

**MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)**Muestra: Cemento Portland CPC 30 (CMTO)**SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA**

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	50	0.958	0.523	45.41	45.80
	47	0.955	0.504	47.23	
	51	0.963	0.532	44.76	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
5°C	6	0.959	0.614	35.97	38.05
	7	0.956	0.598	37.45	
	49	0.953	0.565	40.71	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25°C	4	0.957	0.804	15.99	17.40
	27	0.950	0.776	18.32	
	15	0.955	0.784	17.91	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
40°C	1	0.956	0.843	11.82	11.44
	5	0.957	0.845	11.70	
	2	0.954	0.851	10.80	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	12	0.952	0.847	11.03	13.09
	30	0.952	0.821	13.76	
	35	0.954	0.816	14.47	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	11	0.938	0.616	34.33	33.44
	13	0.954	0.645	32.39	
	16	0.949	0.630	33.61	
Observaciones:					



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: Cemento Portland CPC 30 (CMTO)

SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	1	0.978	0.474	51.53	51.06
	2	0.988	0.488	50.61	
	3	0.976	0.478	51.02	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25°C	1	0.984	0.433	56.00	56.46
	2	0.979	0.396	59.55	
	3	0.979	0.452	53.83	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	1	0.970	0.465	52.06	54.43
	2	0.974	0.516	47.02	
	3	0.944	0.338	64.19	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	1	0.966	0.193	80.02	79.27
	2	0.949	0.219	76.92	
	3	0.951	0.182	80.86	
Observaciones:					

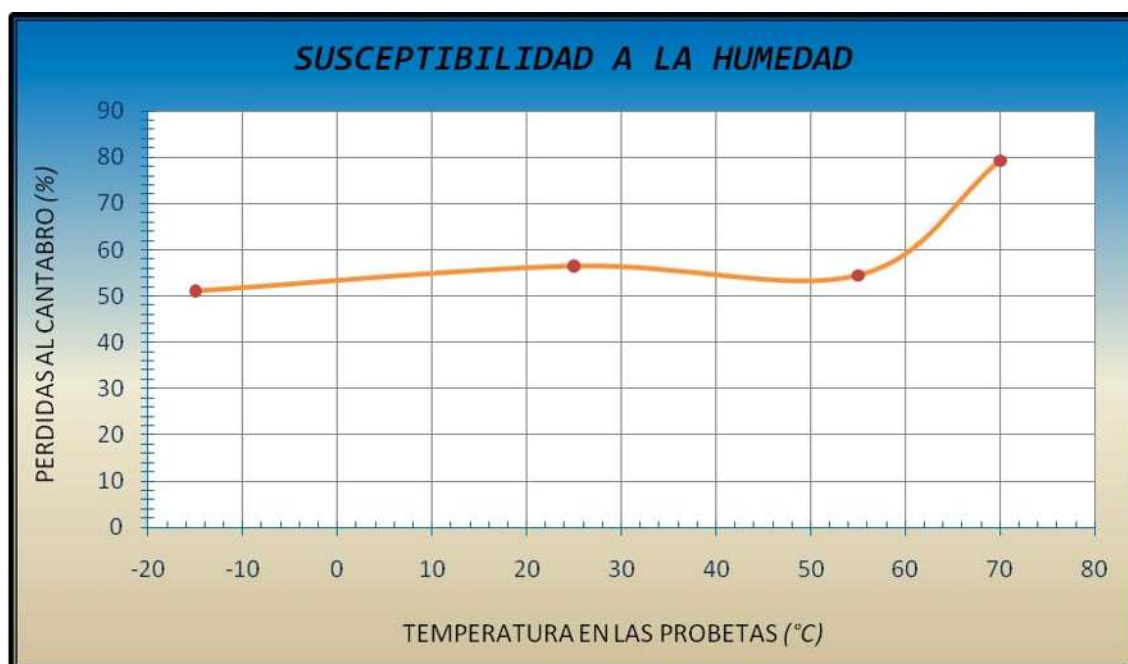


FIGURA 67 Curva de estado del ensayo de susceptibilidad a la humedad aplicado a las probetas elaboradas con Cemento Portland CPC-30.

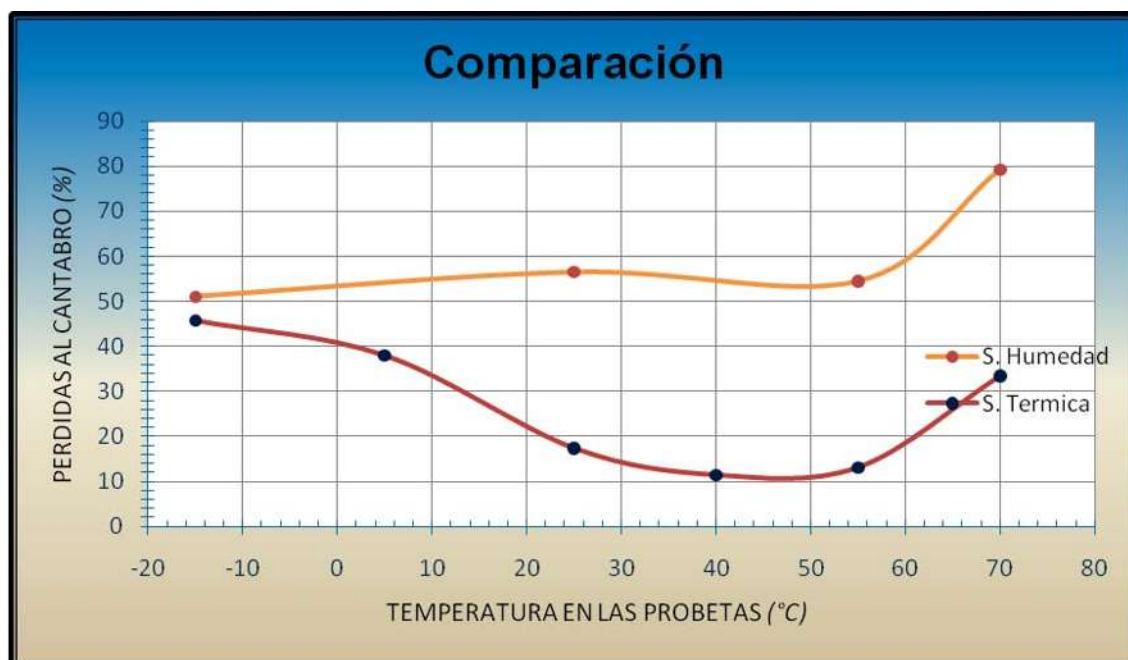


FIGURA 68 Comparación de curvas de estado de los ensayos de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica aplicados a las probetas fabricadas con Cemento CPC-30.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: **Cemento Portland CPC 30 (CMTO)**

SUSCEPTIBILIDAD AL ENVEJECIMIENTO

Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
2 Hrs	1	0.951	0.551	42.06	43.37
	2	0.953	0.539	43.44	
	3	0.955	0.529	44.61	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
4 Hrs	1	0.948	0.543	42.72	45.02
	2	0.953	0.542	43.13	
	3	0.947	0.481	49.21	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
8 Hrs	1	0.942	0.463	50.85	51.74
	2	0.938	0.437	53.41	
	3	0.932	0.457	50.97	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
16 Hrs	1	0.946	0.335	64.59	64.51
	2	0.943	0.301	68.08	
	3	0.943	0.369	60.87	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
32 Hrs	1	0.942	0.530	43.74	49.61
	2	0.937	0.475	49.31	
	3	0.943	0.417	55.78	
Observaciones:					

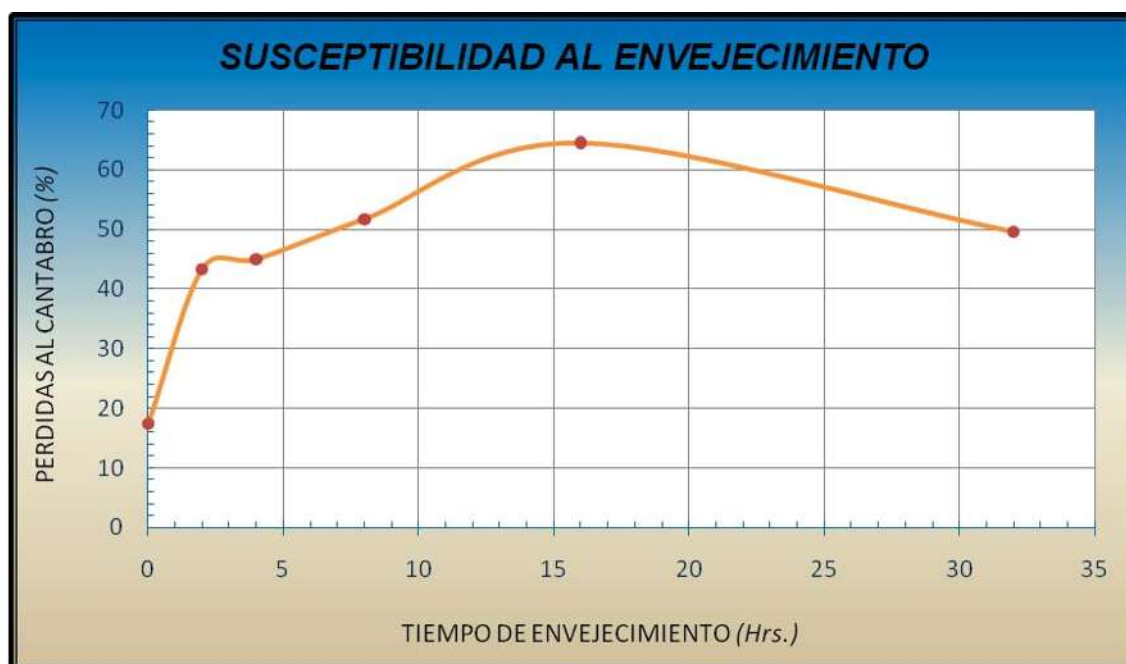


FIGURA 69 Curva de estado del ensayo para susceptibilidad al envejecimiento aplicado a las probetas fabricadas con Cemento Portland CPC-30.



FIGURA 70 Curva de estado para el ensayo de susceptibilidad térmica aplicado a las probetas fabricadas con filler del Banco Cerritos.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: **Banco Cerritos (CRTO)**

SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	36	0.950	0.486	48.84	48.66
	2	0.957	0.482	49.63	
	11	0.960	0.504	47.50	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
5°C	49	0.950	0.556	41.47	43.71
	29	1.056	0.573	45.74	
	15	0.947	0.531	43.93	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25°C	4	0.965	0.825	14.51	14.78
	28	0.957	0.799	16.51	
	6	0.968	0.839	13.33	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
40°C	33	0.962	0.813	15.49	11.01
	23	0.953	0.857	10.07	
	47	0.952	0.881	7.46	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	40	0.953	0.868	8.92	10.31
	25	0.951	0.830	12.72	
	37	0.949	0.861	9.27	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	17	0.949	0.765	19.39	22.35
	14	0.958	0.732	23.59	
	30	0.947	0.719	24.08	
Observaciones:					

★



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”



MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: **Banco Cerritos (CRTO)**

SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	1	0.990	0.471	52.42	54.78
	2	0.984	0.478	51.42	
	3	0.977	0.386	60.49	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25°C	1	0.984	0.325	66.97	69.42
	2	0.986	0.310	68.56	
	3	0.986	0.269	72.72	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	1	0.955	0.258	72.98	76.07
	2	0.963	0.228	76.32	
	3	0.967	0.204	78.90	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	1	0.964	0.189	80.39	83.83
	2	0.964	0.133	86.20	
	3	0.960	0.145	84.90	
Observaciones:					

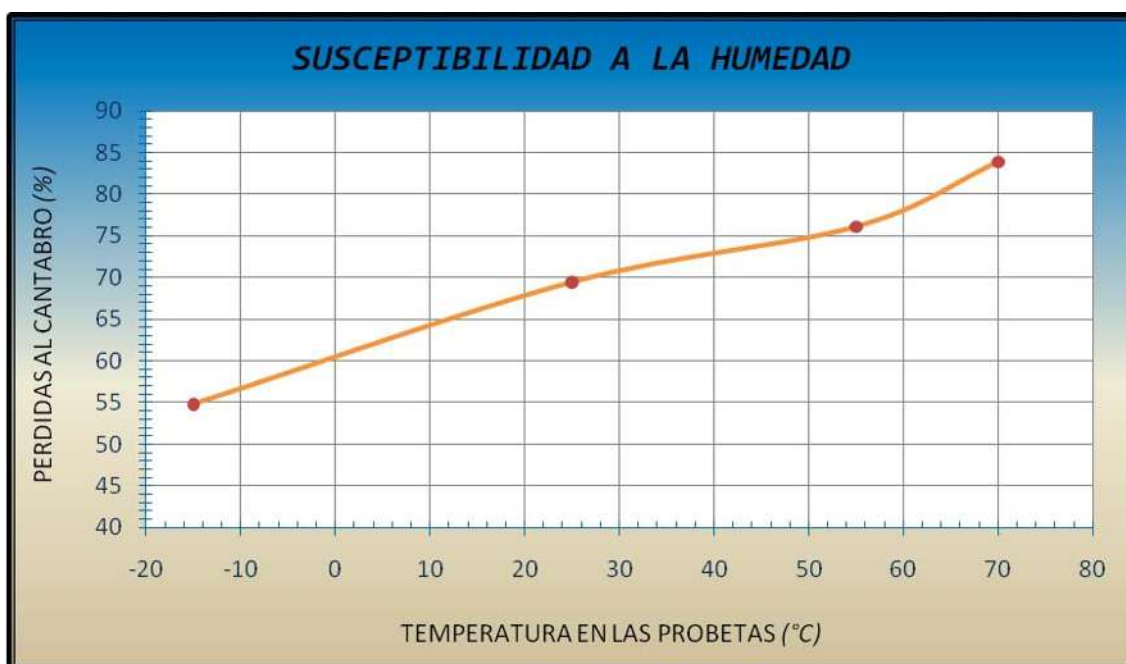


FIGURA 71 Curva de estado del ensayo para la susceptibilidad a la humedad aplicado a la sprobetas fabricadas con filler del Banco Cerritos.

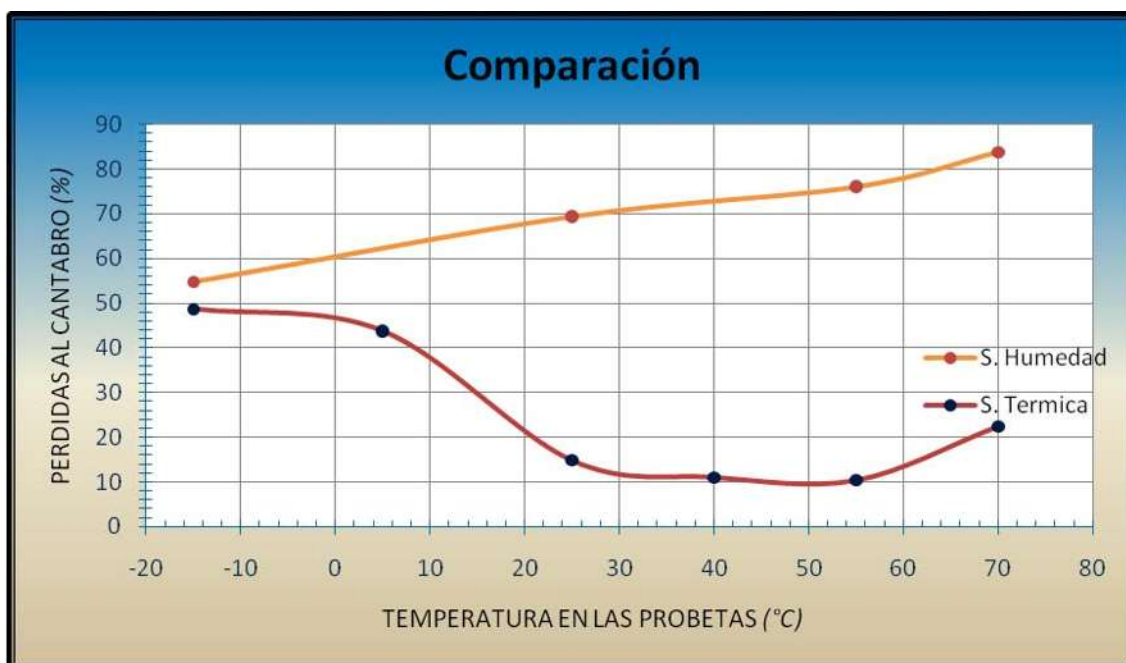


FIGURA 72 Comparación de Curvas de estado de los ensayos de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica aplicados a las probetas fabricadas con filler del Banco Cerritos.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”

MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: **Banco Cerritos (CRTO)**

SUSCEPTIBILIDAD AL ENVEJECIMIENTO

Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
2 Hrs	1	0.946	0.733	22.52	23.88
	2	0.950	0.726	23.58	
	3	0.943	0.702	25.56	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
4 Hrs	1	0.943	0.587	37.75	42.51
	2	0.957	0.549	42.63	
	3	0.944	0.499	47.14	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
8 Hrs	1	0.952	0.450	52.73	53.74
	2	0.957	0.474	50.47	
	3	0.943	0.396	58.01	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
16 Hrs	1	0.934	0.376	59.74	59.92
	2	0.951	0.335	64.77	
	3	0.954	0.427	55.24	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
32 Hrs	1	0.949	0.277	70.81	62.04
	2	0.932	0.419	55.04	
	3	0.929	0.369	60.28	
Observaciones:					

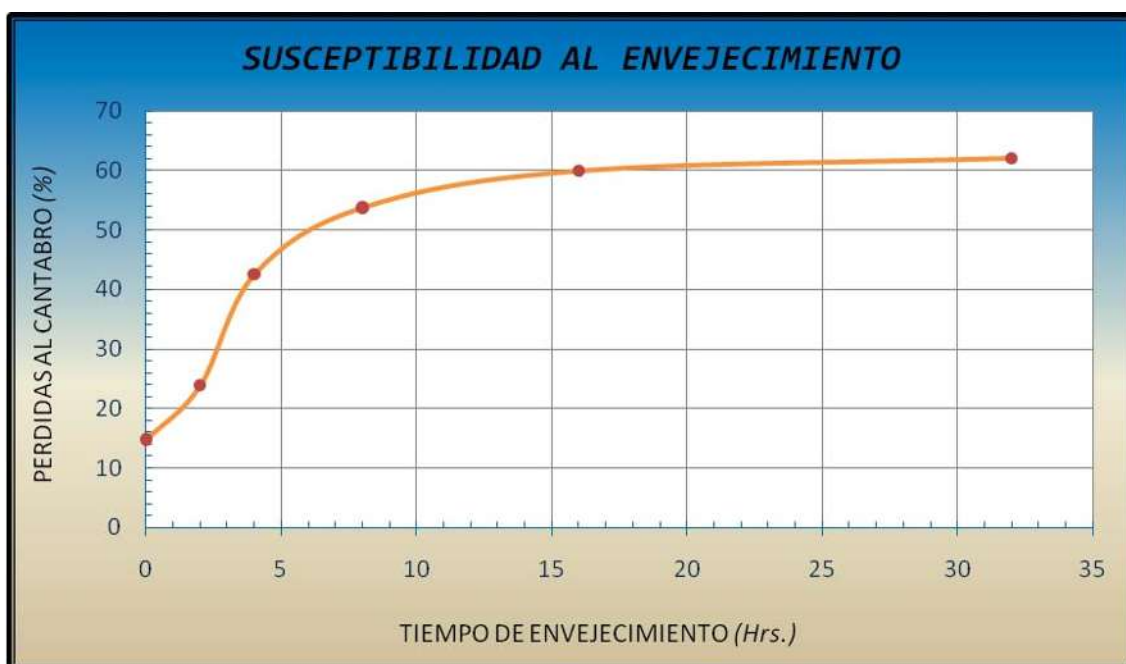


FIGURA 73 Curva de estado del ensayo para susceptibilidad al envejecimiento aplicada a probetas fabricadas con filler del Banco Cerritos.

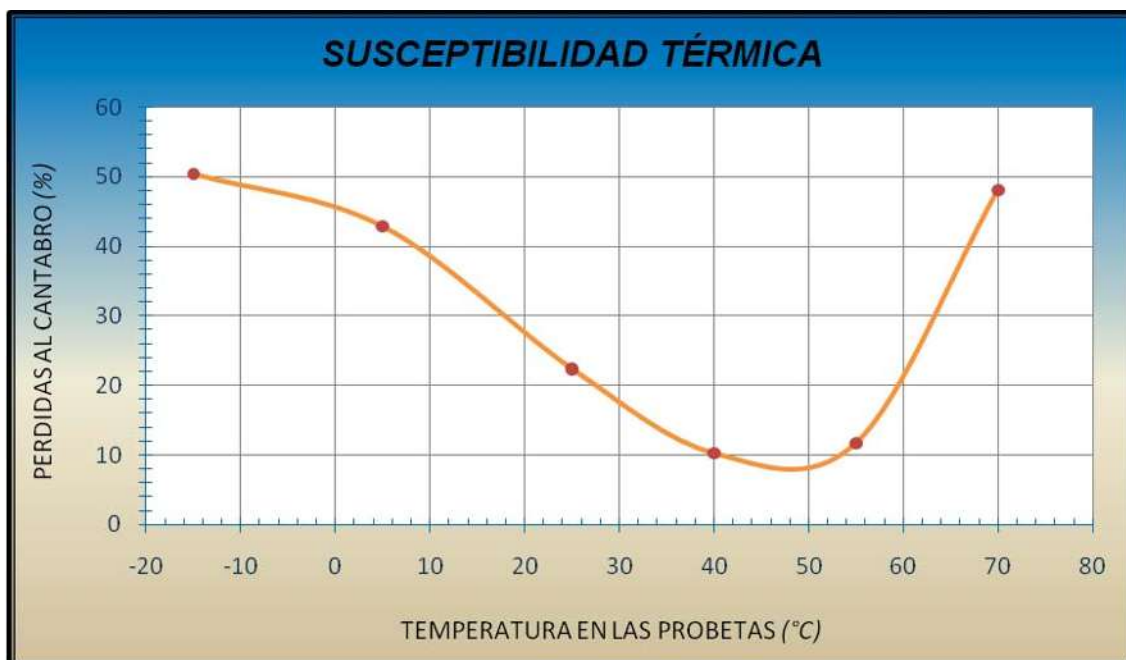


FIGURA 74 Curva de estado para el ensayo de susceptibilidad térmica aplicado a las probetas fabricadas con filler de Agregado de piedra Caliza.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”

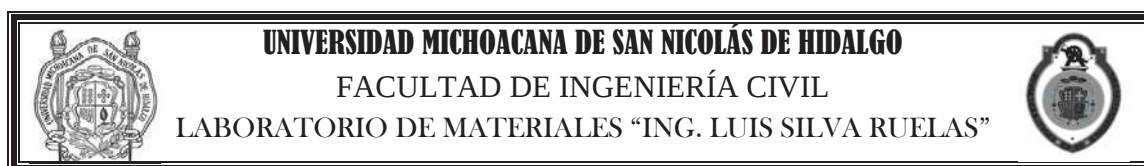


MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: Polvo de Piedra caliza (CLZA)

SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	34	0.955	0.498	47.85	50.41
	47	0.960	0.444	53.75	
	36	0.959	0.483	49.64	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
5°C	48	0.958	0.569	40.61	42.86
	51	0.956	0.539	43.62	
	49	0.956	0.532	44.35	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25°C	35	0.960	0.727	24.27	22.36
	50	0.960	0.765	20.31	
	24	0.960	0.744	22.50	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
40°C	46	0.958	0.854	10.86	10.22
	11	0.959	0.864	9.91	
	23	0.960	0.865	9.90	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	10	0.953	0.846	11.23	11.66
	22	0.957	0.848	11.39	
	44	0.955	0.837	12.36	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	48	0.911	0.437	52.03	48.09
	33	0.928	0.550	40.73	
	11	0.957	0.464	51.52	
Observaciones:					



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”

MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: **Polvo de piedra caliza (CLZA)**

SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD

Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
-15°C	1	0.940	0.384	59.15	56.52
	2	0.988	0.447	54.76	
	3	0.992	0.440	55.65	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
25 °C	1	0.988	0.331	66.50	70.89
	2	0.975	0.180	81.54	
	3	0.990	0.350	64.65	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
55°C	1	0.941	0.206	78.11	78.64
	2	0.974	0.209	78.54	
	3	0.969	0.201	79.26	
Observaciones:					
Temperatura	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
70°C	1	0.976	0.141	85.55	84.14
	2	0.970	0.127	86.91	
	3	0.968	0.194	79.96	
Observaciones:					

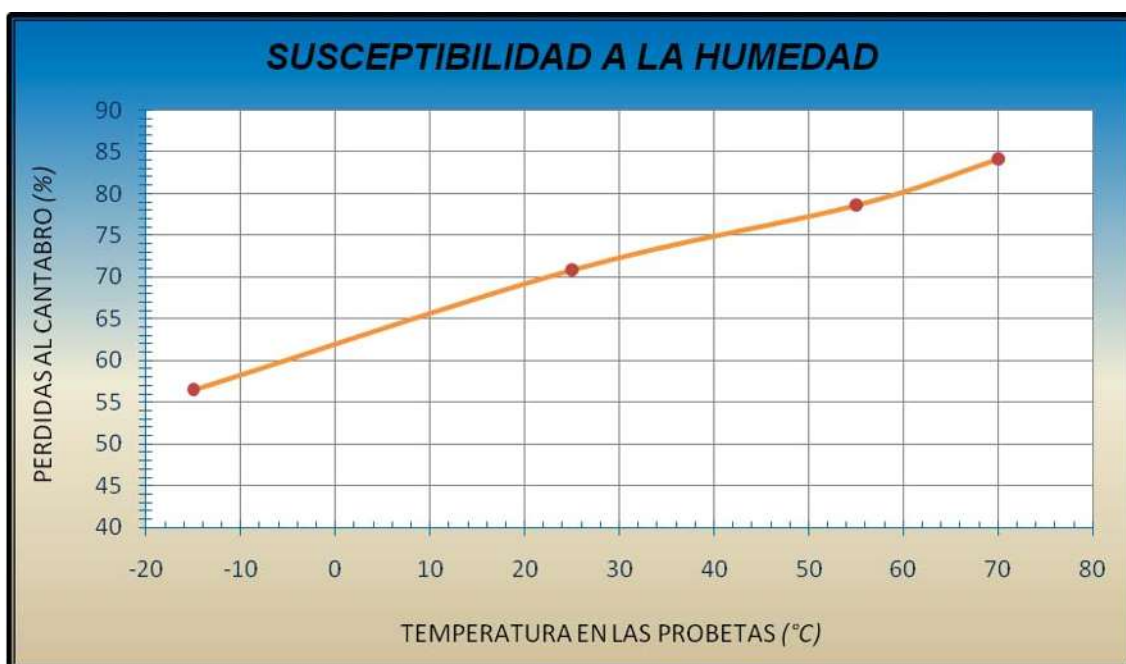


FIGURA 75 Curva de estado para el ensayo de susceptibilidad a la humedad aplicado a las probetas fabricadas con filler de Agregado de piedra Caliza.

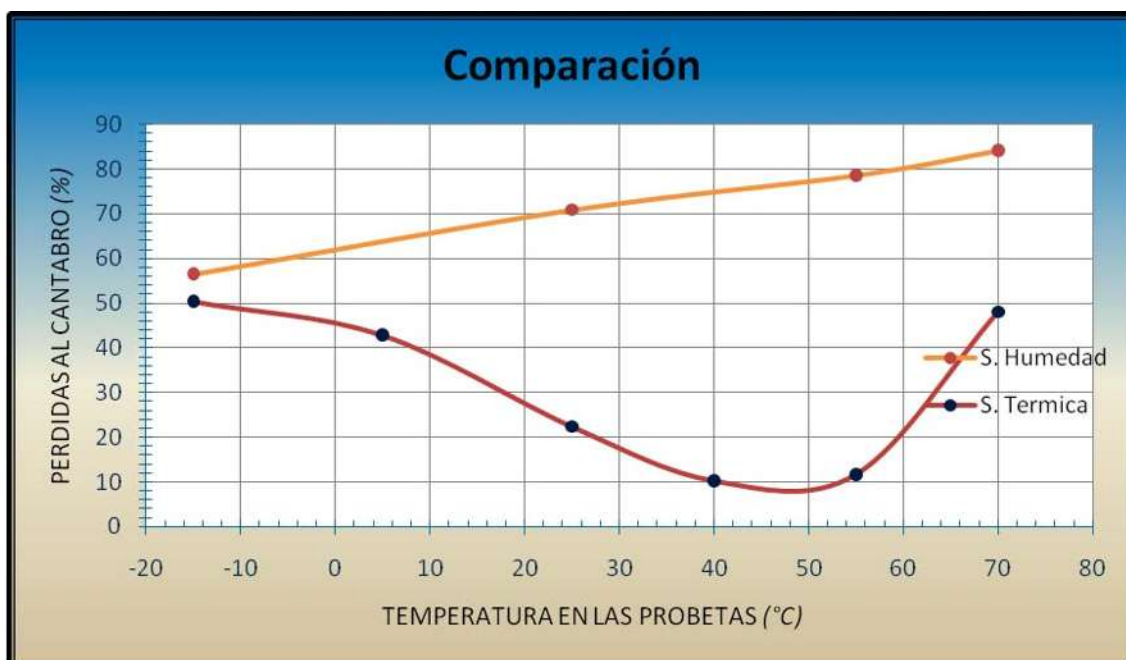
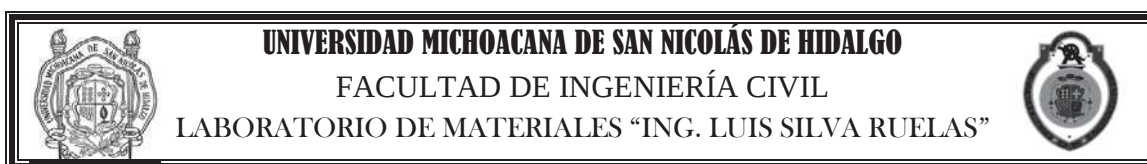


FIGURA 76 Comparación de las curvas de estado de las pruebas de susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad térmica aplicado a las probetas fabricadas con filler de agregado de piedra Caliza.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MATERIALES “ING. LUIS SILVA RUELAS”

MÉTODO UNIVERSAL DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES (UCL®)

Muestra: Polvo de piedra caliza (CLZA)

SUSCEPTIBILIDAD AL ENVEJECIMIENTO

Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
2 Hrs	1	0.956	0.618	35.36	34.07
	2	0.951	0.641	32.60	
	3	0.949	0.624	34.25	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
4 Hrs	1	0.950	0.525	44.74	47.49
	2	0.950	0.484	49.05	
	3	0.951	0.488	48.69	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
8 Hrs	1	0.943	0.389	58.75	49.40
	2	0.950	0.632	33.47	
	3	0.938	0.413	55.97	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
16 Hrs	1	0.944	0.427	54.77	53.82
	2	0.941	0.419	55.47	
	3	0.939	0.458	51.22	
Observaciones:					
Tiempo	No. De probeta	Peso inicial (Pi) Kg	Peso final (Pf) kg	% de perdidas	Promedio %
32 Hrs	1	0.941	0.325	65.46	63.37
	2	0.951	0.399	58.04	
	3	0.943	0.315	66.60	
Observaciones:					

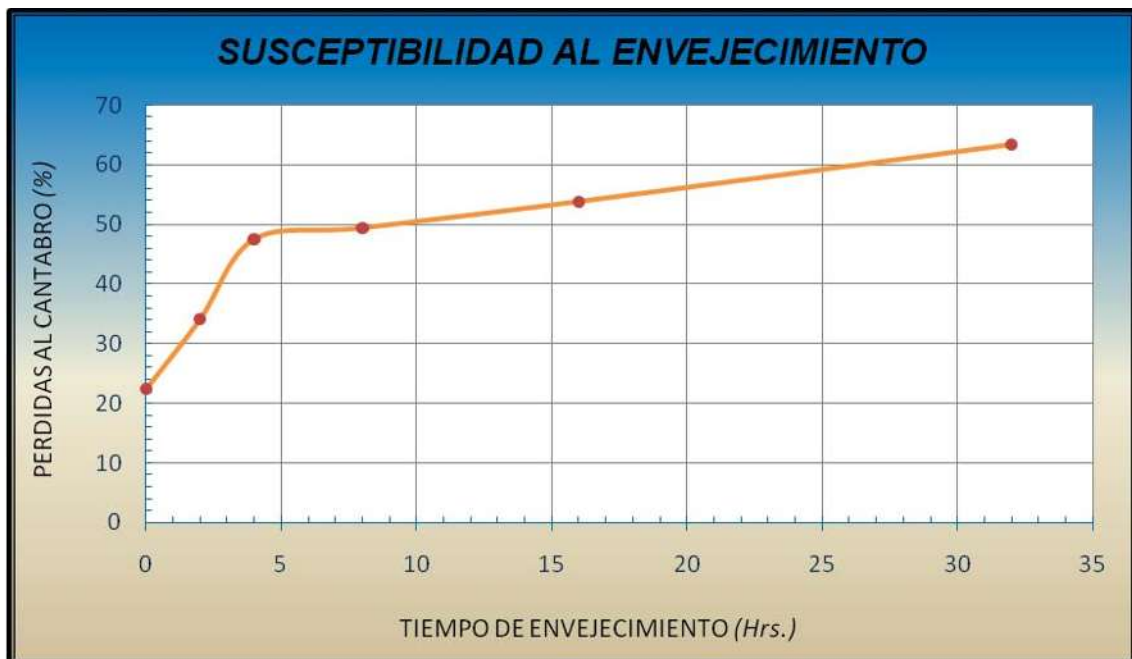


FIGURA 77 Curva de estado para el ensayo de susceptibilidad al envejecimiento aplicado a las probetas fabricadas con filler de Agregado de piedra Caliza.

A continuación se observan algunas fotos comparativas entre materiales.



FIGURA 78 Comparación de las probetas después de ser ensayadas.

En la figura 78 se muestra como quedan las probetas después de ser sometidas al ensayo cántabro de perdidas por desgaste, estas probetas fueron probadas para ver cómo se comportan bajo el efecto de la humedad y a una temperatura de 70°C y los diferentes tipos de filler que se analizaron en esta son Cemento (CMTO), Cerritos (CRTOS) y Caliza (CLZA).

A continuación se muestran las tablas y gráficas generales de los resultados de los 6 tipos de filler sometidos a los efectos de temperatura, humedad y envejecimiento con las cuales nos vamos a dar una idea más clara del comportamiento que tienen los 6 diferentes tipos de filler y podremos hacer una comparación de los mismos.

Tabla 32 Resultados generales para la susceptibilidad térmica.

TEMPERATURA		AGC	ARCILLA	CERRITOS	CAL	CEMENTO	CALIZA
1	-15	46.76	49.55	48.66	44.72	45.80	50.41
2	5	41.34	37.66	43.71	40.39	38.05	42.86
3	25	18.22	18.69	14.78	18.46	17.40	22.36
4	40	11.72	12.80	11.01	11.20	11.44	10.22
5	55	14.09	9.24	10.31	13.88	13.09	11.66
6	70	25.15	51.36	22.35	24.19	34.44	48.09

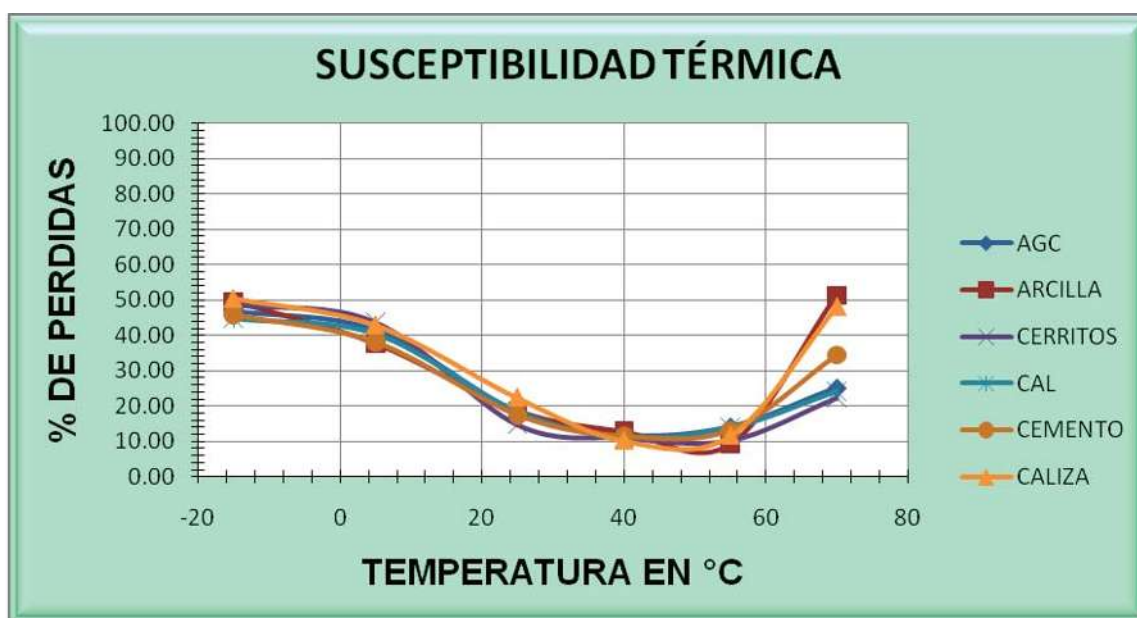


FIGURA 79 Comparación de las curvas de estado de los 6 tipos de filler, para susceptibilidad térmica.

Tabla 33 Resultados generales para la susceptibilidad a la humedad.

TEMPERATURA		AGC	ARCILLA	CERRITOS	CAL	CEMENTO	CALIZA
1	-15	56.61	64.24	54.78	57.20	51.06	56.52
2	25	69.39	72.89	69.42	52.44	56.46	70.89
3	40	80.40	80.95	76.07	24.31	54.43	78.64
4	70	87.01	86.99	83.83	81.70	79.27	84.14

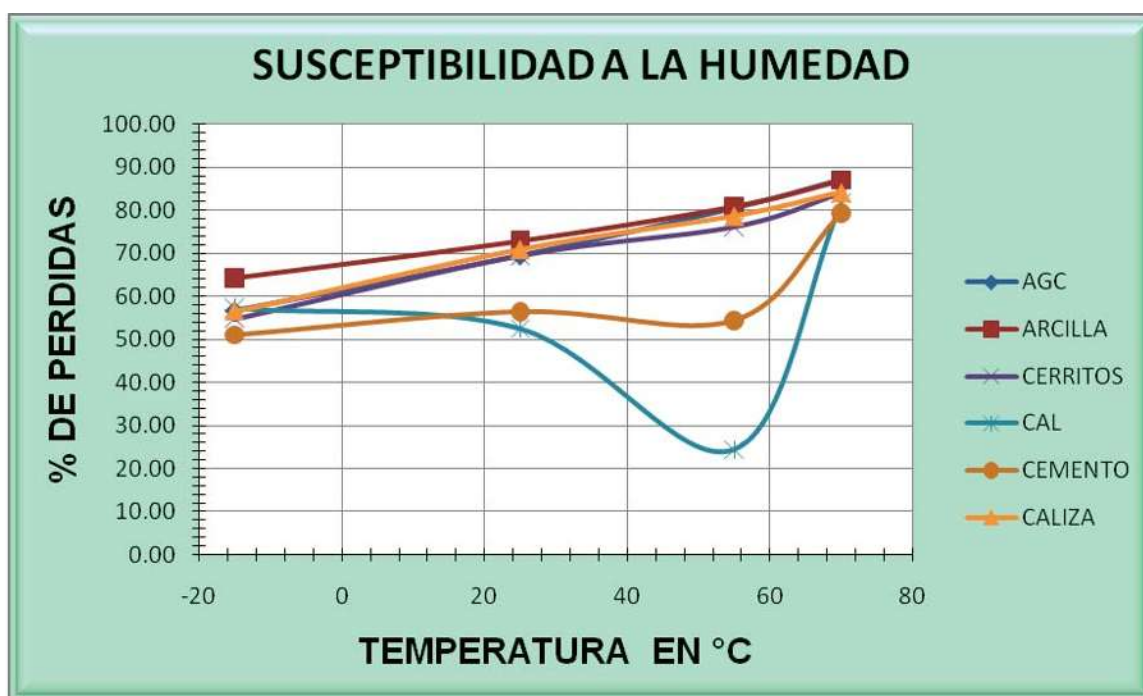


FIGURA 80 Comparación de las curvas de estado para la susceptibilidad a la humedad.

Tabla 34 Resultados generales de susceptibilidad al envejecimiento.

TEMPERATURA		AGC	ARCILLA	CERRITOS	CAL	CEMENTO	CALIZA
1	2	32.36	30.26	23.88	30.93	43.37	34.07
2	4	39.53	47.97	42.51	38.74	45.02	47.49
3	8	51.41	48.45	53.74	39.93	51.74	49.90
4	16	55.10	58.80	59.92	51.32	64.51	53.82
5	32	68.50	66.06	62.04	56.15	49.61	63.37

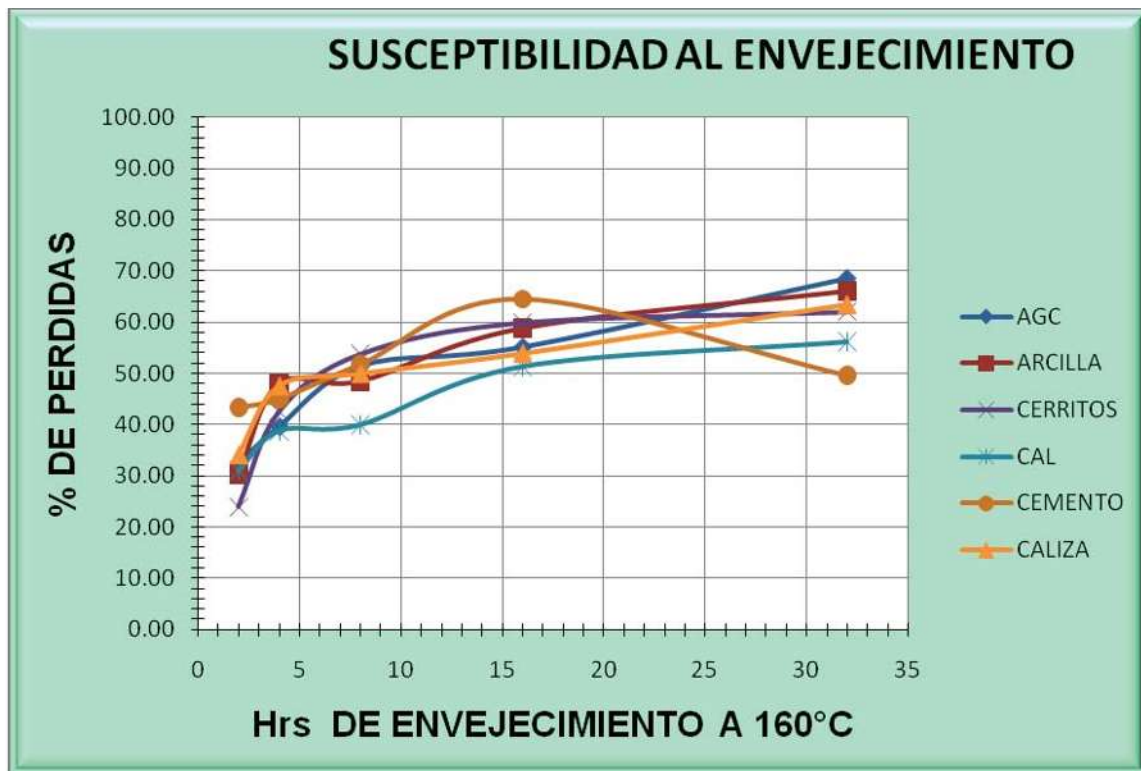


FIGURA 81 Comparación de las curvas de estado para susceptibilidad al envejecimiento de los 6 tipos de filler.

CONCLUSIONES

De acuerdo con la gráfica anterior para la susceptibilidad térmica podemos observar que los 6 tipos de filler tienen un comportamiento muy parecido bajo estas condiciones. Pero de los seis hay cuatro tipos de filler que son los que tienen el mejor comportamiento y son: Cal, AGC, Cemento y el filler del Banco Cerritos porque son los que presentan menores pérdidas en las 6 temperaturas analizadas, pero el filler que mejor se comporta es la Cal.

En el caso del análisis para la susceptibilidad a la humedad solo hay dos tipos de filler que tuvieron el mejor comportamiento y en este caso son la Cal y el Cemento por que los otros 4 tipos de filler el crecimiento de pérdidas tiende a ser casi lineal, sin embargo la cal y el cemento tienden a bajar las pérdidas y por lo tanto a mejorar su comportamiento conforme aumenta la temperatura y solo a 70°C se vuelven a incrementar sus pérdidas aun más que a bajas temperaturas.

En la gráfica para susceptibilidad al envejecimiento sin dudas el que mejor comportamiento presenta es la Cal. A 2 hr de envejecimiento las pérdidas no son tan grandes en comparación con otros tipos de filler como el Cemento o el agregado de piedra Caliza pero sin embargo se mantiene entre los que tienen pérdidas intermedias, su comportamiento se mejora al incrementarse el tiempo de envejecimiento ya que es el que se mantiene con menos pérdidas a cualquier tiempo de envejecimiento.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente; revista “ingeniería e investigación” universidad nacional de Colombia, Bogotá Colombia, vol. 27, diciembre de 2007.

Revista ingeniería y desarrollo. No.23 fundación universidad del norte “Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas” Grading Influence On Rutting In The Asphalt Mistures. Universidad Militar Nueva Granada, Barranquilla June/Dec. 2008.

[http://es.wikipedia.org/wiki/Mezcla asf%C3%A1ltica](http://es.wikipedia.org/wiki/Mezcla_asf%C3%A1ltica)

http://www.scielo.unal.edu.co/scielo.php?pid=S0122-34612008000100004&script=sci_arttext&tlng=en

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2009/bmfcir859s/doc/bmfcir859s.pdf>

<http://upcommons.upc.edu/e-prints/handle/2117/5360?locale=es>

<http://publications.piarc.org/ressources/documents/actes-seminaires09/D2-cancun0809/15-alfonso-elizondo-mexicansstandards.pdf>

http://www.pemex.com/files/content/GNT-SSNP-C006-2005_Rev0_.pdf

<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/html/643/64327302/64327302.html>

http://www.scielo.unal.edu.co/scielo.php?pid=S0122-34612008000100004&script=sci_arttext&lng=en para ver las deformaciones a bajas y altas temperaturas.

http://www.e-asphalt.com/orig_asf/historia_del_asfalto.htm

<http://www.misrespuestas.com/que-es-el-asfalto.html>

http://www.e-asphalt.com/orig_asf/origenasf.htm (**Asphalt Machineries and Equipment**)

http://html.rincondelvago.com/asfalto_1.html

<http://www.scribd.com/doc/18190646/Agregados-Petereos>

<http://www.construmatica.com/construpedia/Filler>

http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0222108-122735//01_miroRecasens_portadaindex.pdf

http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/2855/1/miro_carreteras_2.pdf

<http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transfencia/Transferencia52/eli3-52.html>

http://revistaiv.lanamme.ucr.ac.cr/index.php?option=com_content&task=view&id=68&Itemid=

<http://www.latindex.ucr.ac.cr/vial001-02.php> (ARTÍCULO DE ALARCON)

http://www.vulka.es/noticia/mezcla-de-asfalto-y-filler_1686.html

<http://www.tesisymonografias.net/ensayo-de-granulometria/2/>

<http://scholar.google.com.mx/>

http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/manual/EG-2000/cap4/seccion423.htm

<http://www.vinv.ucr.ac.cr/latindex/vial001/02-resistencias.pdf>

http://www.e-asphalt.com/orig_asf/origenasf.htm

<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3027971>