

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama
de las Vías Terrestres

CARACTERIZACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE FILLER EMPLEADOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA PARA CARRETERAS



TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE
LAS VÍAS TERRESTRES

PRESENTA:

ING. MARIO FRANCISCO ÁLVAREZ LOYA

ASESOR DE TESIS:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA

Morelia, Michoacán, Junio de 2012



A Dios...

*“Cuando yo era niño, hablaba como niño, pensaba como niño, juzgaba como niño;
mas cuando ya fui hombre, dejé lo que era de niño.”*

1 Cor. 13:11



AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas especiales a las que agradezco su valiosa compañía en las diferentes etapas de mi vida, sus sabios consejos y motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.

A mis padres

Como los ejemplos de perseverancia y constancia para lograr toda meta o propósito, valores que a lo largo de la vida me han infundado siempre y del que hoy me dejan como una muestra tangible de su dedicación y empeño, la educación.

A mis abuelos

El reflejo de la sabiduría y la paciencia, han sido y siempre serán los mentores más valiosos para enfrentar y superar los desafíos de la vida.

A mis hermanos

Por su inmenso apoyo y gratitud constante en todo momento, la confianza y el cariño que siempre nos ha mantenido unidos para afrontar y disfrutar juntos los triunfos del uno para los otros.



A mis amigos

Por su apoyo y motivación incondicional en el logro del presente documento, la confianza y esperanza de concluir con un logro en esta vida.

A mis profesores

Por su apoyo, entrega y dedicación en la labor de enseñanza que hoy día me permite cerrar un ciclo más en la vida... y permitirme ver que puedo iniciar uno nuevo.

*Una dedicatoria especial a la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo** y en especial a la **Facultad de Ingeniería**, por la oportunidad brindada de desarrollarme en ella.*

¡Gracias!

Mario Francisco Álvarez Loya.

Índice General

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	18
Antecedentes	18
Contenido de Tesis	23
OBJETIVOS	25
CAPÍTULO I	
TECNOLOGÍA, DESARROLLO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS VÍAS DE COMUNICACIÓN PAVIMENTADAS	
I.1 Introducción	28
I.2 Las carreteras Romanas	35
I.3 Las carreteras antes del siglo XIX	37
I.4 Las carreteras del siglo XIX	40
I.5 Características de las carreteras pavimentadas en México	43
I.6 Agregados pétreos empleados en las mezclas asfálticas densas para carpetas	48
I.6.1 Propiedades físico-químicas y características de los agregados pétreos para mezclas asfálticas	52
I.6.2 Clasificación, características y requisitos de calidad de los agregados pétreos para mezclas asfálticas densas según normativa SCT	58

I.7	Cementos asfálticos	62
I.7.1	Propiedades y características físico-químicas	66
I.7.2	Comportamiento mecánico y reológico del asfalto	71
I.7.3	Aspectos involucrados en el envejecimiento del asfalto	75
I.8	Mezclas asfálticas	78
I.8.1	Principales características y comportamientos de las mezclas asfálticas	79
I.8.2	Parámetros analizados en el diseño de mezclas asfálticas	81

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DEL FILLER Y SU INFLUENCIA EN EL

COMPORTAMIENTO Y DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

II.1	Introducción	85
II.2	Procedencia del polvo mineral o filler	87
II.3	Características y efectos del empleo de filler en las mezclas asfálticas	88
II.4	Influencia del filler en el comportamiento y desempeño de una mezcla asfáltica	89
II.5	Interacción filler – asfalto (<i>mástico</i>)	92

CAPÍTULO III

ESTUDIOS EXPERIMENTALES

III.1	Introducción	95
III.2	Plan de trabajo	97
III.3	Tipos de filler o polvos minerales analizados	100
III.4	Estudios de caracterización tradicional aplicados al filler	102
III.4.1	Plasticidad	102
III.4.1.a	Determinación del Limite Líquido (ωL)	105
III.4.1.b	Determinación del Límite Plástico (ωP)	107
III.4.1.c	Determinación del Índice Plástico (IP)	109

III.4.1.d	Determinación del Límite de Contracción (<i>LC</i>)	110
III.4.1.e	Determinación de la Contracción Lineal (<i>CL</i>)	113
III.4.2	Equivalente de arena	114
III.4.3	Determinación del pH	119
III.4.4	Azul de metileno	123
III.5	Estudios de caracterización no tradicional aplicados al filler	126
III.5.1	Análisis granulométrico de partícula fina	126
III.5.2	Microscopia Electrónica de Barrido (<i>MEB</i>)	129
III.5.3	Difracción de Rayos X (<i>DRX</i>)	131
III.6	Estudio de la influencia del tipo de filler ante el efecto térmico, la humedad y el envejecimiento del mástico mediante el método UCL®	136
III.6.1	Evaluación de la susceptibilidad térmica	144
III.6.2	Evaluación de la susceptibilidad a la humedad	146
III.6.3	Evaluación de la susceptibilidad al envejecimiento	147
III.7	Estudio del efecto del tipo de filler en las propiedades reológicas del mástico mediante el reómetro de corte dinámico (<i>DSR</i>)	150

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

IV.1	Estudios de caracterización tradicional aplicados al filler	156
IV.1.1	Plasticidad	156
IV.1.2	Equivalente de arena	159
IV.1.3	Determinación del pH	162
IV.1.4	Azul de metileno	165
IV.2	Estudios de caracterización no tradicional aplicados al filler	168
IV.2.1	Análisis granulométrico de partícula fina	168
IV.2.2	Microscopia Electrónica de Barrido (<i>MEB</i>)	171
IV.2.3	Difracción de Rayos X (<i>DRX</i>)	173

IV.3	Estudio de la influencia del tipo de filler ante el efecto térmico, la humedad y el envejecimiento del mástico mediante el método UCL®	175
IV.3.1	Evaluación de la susceptibilidad térmica	175
IV.3.2	Evaluación de la susceptibilidad a la humedad	176
IV.3.3	Evaluación de la susceptibilidad al envejecimiento	178
IV.4	Estudio del efecto del tipo de filler en las propiedades reológicas del mástico mediante el reómetro de corte dinámico	180
IV.4.1	Evaluación del modulo complejo (G^*)	182
IV.4.2	Evaluación de la viscosidad compleja (η^*)	184
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	186
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	189



Índice de Figuras

CAPÍTULO I

TECNOLOGÍA, DESARROLLO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS VÍAS DE

COMUNICACIÓN PAVIMENTADAS

Fig. I.1	Carretera Real Persa.	29
Fig. I.2	Estructura de la carretera procesional en el templo de Ishtar.	30
Fig. I.3	Características de los mejoramientos realizados para el cruce en zonas pantanosas y húmedas.	31
Fig. I.4	Analogía de la construcción de carreteras pavimentadas en la Isla de Malta, Grecia y la Isla de Creta.	32
Fig. I.5	Carretera más importante en la Isla de Creta durante el año 3,000 a 1,100 a. C.	32
Fig. I.6	Características del pavimento usado en la Isla de Creta.	33
Fig. I.7	Carretera del Imperio Inca.	34
Fig. I.8	Estructura típica de una calzada de máxima calidad construida por los Romanos y su equivalente a la estructuración actual.	36
Fig. I.9	Sección de pavimento tipo propuesta por Huber Gautier.	38
Fig. I.10	Sección de pavimento tipo propuesta por Pierre-Marie-Jerôme Trésaguet.	39
Fig. I.11	Sección de pavimento desarrollada por Thomas Telford	40
Fig. I.12	Sección de pavimento desarrollada por Jonh Loudon McAdam.	41
Fig. I.13	Movimiento de pasajeros y carga en México.	45



Fig. I.14	Forma de las partículas de agregado pétreo.i. Redondeada, ii. Irregular, iii. Angular, iv. Lajeada, v. Alargada, vi. Alargada-Lajeada	53
Fig. I.15	Diagrama de la fabricación de los productos asfálticos.	64
Fig. I.16	Endurecimiento del asfalto después de haber sido expuesto a altas temperaturas.	68
Fig. I.17	Rigidez del asfalto y ángulo de fase.	72
Fig. I.18	Cambio en la rigidez del asfalto debido a la temperatura.	73
Fig. I.19	Propiedades del asfalto en función de la temperatura.	74
Fig. I.20	Variación de los componentes de un asfalto envejecido durante un periodo de 18 años.	77

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DEL FILLER Y SU INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO Y DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Fig. II.1	Esquema de interacción filler – asfalto.	93
-----------	--	----

CAPÍTULO III

ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Fig. III.1	Muestra de filler para previo al ensayo.	104
Fig. III.2	Muestra de filler saturada uniformemente.	104
Fig. III.3	Muestra de filler homogenizada previo al ensayo.	105
Fig. III.4	Colocación del material en la copa de casa grande.	105
Fig. III.5	Abertura en la parte central del material mediante el ranurador.	106
Fig. III.6	Unión entre bordes inferiores durante el ensayo.	106
Fig. III.7	Muestra para el cálculo de contenido de humedad del ensayo de límite líquido.	107
Fig. III.8	Comparación del diámetro del rollo de material obtenido con el alambre de diámetro patrón.	108



Fig. III.9	Muestra para el cálculo de contenido de humedad para el límite plástico.	109
Fig. III.10	Capa de aceite para impedir adherencia entre la muestra y las paredes de la capsula.	110
Fig. III.11	Llenado de capsula para ensayo de límite de contracción.	111
Fig. III.12	a) Características de la muestra húmeda dentro de la cápsula. b) Características de la muestra tras un periodo de secado a temperatura ambiente.	111
Fig. III.13	a) Características de la muestra húmeda dentro de la barra metálica. b) Características de la muestra tras un periodo de secado a temperatura ambiente.	113
Fig. III.14	Muestras conformadas con diferente tipo de filler incorporado.	115
Fig. III.15	Colocación del material dentro de la probeta que contiene la solución coagulante.	116
Fig. III.16	Proceso de reposo durante 10 minutos	117
Fig. III.17	Lavado de las paredes de la probeta con solución coagulante.	117
Fig. III.18	Muestras concentradas de filler para determinar su pH.	121
Fig. III.19	Almacenamiento y reposo de las muestras concentradas de filler.	121
Fig. III.20	Calibración del pH-metro mediante la solución buffer previo al ensayo.	122
Fig. III.21	Muestras representativas de cada material para realizar el ensayo de granulometría fina.	127
Fig. III.22	Equipo COULTERLS 100Q de difracción de partículas con láser analizador de tamaño.	127
Fig. III.23	Ubicación del depósito en el equipo para las muestras a ser ensayadas.	128
Fig. III.24	Obtención y registro en la PC de la información generada para la muestra durante el ensayo.	128
Fig. III.25	Muestras representativas de cada filler para el ensayo de microscopia electrónica de barrido.	130
Fig. III.26	Microscopio electrónico de barrido empleado para el análisis de las muestras.	130



Fig. III.27	Encargado de la operación del microscopio electrónico de barrido durante el ensayo.	131
Fig. III.28	Colocación de la muestra en la pastilla metálica previo al análisis de difracción de rayos X.	133
Fig. III.29	Enrasado y nivelación de la superficie de la muestra para el ensayo.	133
Fig. III.30	Equipo de difracción de rayos X empleado para el ensayo.	134
Fig. III.31	Espacio en el que se coloca la pastilla con el material preparado para el análisis.	135
Fig. III.32	Identificación de las fases cristalinas para la muestra a través de tarjetas mineralógicas.	136
Fig. III.33	Muestreo en banco de materiales para la obtención de la fracción pétreo.	140
Fig. III.34	a) Cribado y separación de las fracciones requeridas para el ensayo.b)Lavado de las fracciones necesarias para la fabricación de las probetas.c)Secado de las fracciones pétreas previo a su empleo.	140
Fig. III.35	Captación del agua empleada para el proceso de lavado y su disposición final.	141
Fig. III.36	Compactador y moldes Marshall empleados para la fabricación de las probetas de ensayo.	141
Fig. III.37	Pre calentamiento de los agregados pétreos y los moldes Marshall.	142
Fig. III.38	Adición del asfalto a los agregados pétreos y mezclado de los mismos.	143
Fig. III.39	Compactación de la mezcla de asfalto, filler y agregados potros mediante el compactador Marshall.	143
Fig. III.40	Identificación y almacenamiento de las probetas tipo Marshall fabricadas.	144
Fig. III.41	Exposición de las probetas elaboradas con cada tipo de filler a las diferentes temperaturas de ensayo.	145
Fig. III.42	Pesado de la probeta tipo antes y después del ensayo en la máquina de los ángeles.	145



Fig. III.43	Probetas sometidas a baño María a $60 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 horas como parte del preacondicionamiento.	146
Fig. III.44	a)Cortado de la malla metálica para confinamiento de las probetas.b)Sujeción de la malla a la sección de la probeta.c)Condición final de las probetas tras protegerlas con la malla metálica.	148
Fig. III.45	Probetas introducidas al horno para proceso de envejecimiento.	148
Fig. III.46	Reómetro de corte dinámico (DSR) empleado para la caracterización del mástico.	151

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Fig. IV.1	Ubicación de los diferentes tipos de filler en la carta de plasticidad.	156
Fig. IV.2	Ubicación de los diferentes tipos de filler en la carta de plasticidad.	159
Fig. IV.3	Deterioro de las calles de Morelia durante época de lluvias, como consecuencia de la presencia de arcilla en el agregado pétreo.	160
Fig. IV.4	Valores de pH obtenidos en casa una de las muestras.	163
Fig. IV.5	Valores de Azul de Metileno obtenidos para cada muestra de polvo mineral o filler.	166
Fig. IV.6	Comparación entre los Valores de Azul de Metileno y los valores obtenidos mediante el ensayo de equivalente de arena por cada muestra de filler.	167
Fig. IV.7	Gráfica de la distribución granulométrica acumulada de tamaños de partícula.	168
Fig. IV.8	Gráfica de la distribución granulométrica diferencial de tamaños de partícula.	169
Fig. IV.9	Fotografías de cada muestra de filler tomada a 10, 000 aumentos.	171
Fig. IV.10	Curvas de estado para la evaluación de la susceptibilidad térmica.	175
Fig. IV.11	Curvas de estado para la evaluación de la susceptibilidad a la humedad.	177



Fig. IV.12	Curvas de estado para la evaluación de la susceptibilidad al envejecimiento.	178
Fig. IV.13	Curvas de Modulo complejo vs temperatura.	183
Fig. IV.14	Curvas de viscosidad compleja vs temperatura.	185



Índice de Tablas

CAPÍTULO I

TECNOLOGÍA, DESARROLLO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS VÍAS DE COMUNICACIÓN PAVIMENTADAS

Tabla I.1	Longitud de la Red Nacional Carretera por tipo de camino, estado superficial y carriles.	44
Tabla I.2	Accidentes y sus saldos en carreteras de jurisdicción federal.	46
Tabla I.3	Requisitos granulométricos para cuando el tránsito esperado sea igual o menor a un millón de ejes equivalentes.	59
Tabla I.4	Requisitos de calidad del material pétreo para cuando el tránsito esperado sea igual o menor a un millón de ejes equivalentes.	60
Tabla I.5	Requisitos granulométricos para cuando el tránsito esperado sea mayor a un millón de ejes equivalentes o tenga cualquier valor.	61
Tabla I.6	Requisitos de calidad del material pétreo para cuando el tránsito esperado sea mayor a un millón de ejes equivalentes o tenga cualquier valor.	62

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DEL FILLER Y SU INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO Y DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS



CAPÍTULO III

ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Tabla III.1	Cálculo de las cantidades en peso retenidas por malla de la muestra compuesta de 130 g para el ensayo de equivalente de arena.	115
Tabla III.2	Proporciones de los materiales utilizadas para la fabricación de las probetas tipo Marshall.	139

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla IV.1	Valores de pH obtenidos para cada muestra de filler.	162
Tabla IV.2	Valores de azul de metileno obtenidos para cada muestra de filler.	165
Tabla IV.3	Polvos minerales o filler correspondientes a las claves utilizadas para el ensayo.	172
Tabla IV.4	Minerales identificados en los polvos minerales o filler.	173
Tabla IV.5	Clasificación de los diferentes tipos de filler empleados en el presente estudio en función del tamaño de partícula fila en el percentil 50.	181



RESUMEN

Se sabe que es posible adicionar cualquier elemento al asfalto, con la finalidad de modificar su comportamiento y lograr optimizar el desempeño. Sin embargo, se ha observado que en todas las obras que implican la construcción de mezclas asfálticas en México, no ha sido tomado en cuenta el efecto que el tipo de polvo mineral o filler (material pétreo que pasa la malla #200) produce en el comportamiento mecánico de éstas, debido a que la actual Normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), no considera parámetros físico-químicos y mineralógicos del polvo mineral para el control de calidad de esta fracción pétreo.

A la combinación de filler y asfalto se le conoce como masa asfáltica o mástico, la cual es fundamental para garantizar la impermeabilidad y durabilidad de la carpeta asfáltica, debido a que el mástico proporciona rigidez, la cual permite a las partículas de agregado permanecer unidas ante los efectos provocados por la afluencia vehicular.

Conocer la interacción física entre el filler y el asfalto, atendiendo a las características físico-químicas y mineralógicas del filler, propicia la posibilidad de hacer recomendaciones para el control de calidad de los diferentes polvos minerales que pueden ser adicionados a la mezcla asfáltica o que se encuentran presentes en el agregado pétreo (material de recuperación), dando como resultado la construcción de carpetas asfálticas durables.



Derivado de la problemática anterior, se propuso desarrollar el presente trabajo de tesis, en el que se determinaron y evaluaron las características físico-químicas y mineralógicas de los 12 tipos diferentes de polvo mineral o filler, los cuales se seleccionaron de tal manera que se abarcara toda la gama de materiales naturales e industrializados, que son frecuentemente empleados en la construcción de mezclas asfálticas en las regiones de Michoacán y Guadalajara.

Para lograr la caracterización de los 12 polvos minerales, se considero un programa de ensayos de laboratorio dividido en tres etapas. La primera etapa considera la caracterización de cada filler mediante las pruebas y procedimientos indicados por la Normativa SCT para asegurar la calidad de la fracción fina de los pétreos; la segunda etapa contempla la caracterización de cada filler mediante equipos modernos que son utilizados en el análisis de materiales aplicados a la industria metalúrgica, pero que por el tipo de parámetros a evaluar es posible emplearlos para analizar estas doce muestras; y finalmente, la tercera etapa considera el análisis y evaluación del mástico formado con cada muestra de filler, mediante la metodología de Caracterización de Ligantes UCL®, y el estudio del comportamiento reológico del mástico a través del Reómetro de Corte Dinámico (DSR).

Debido a que en la construcción de pavimentos flexibles, el tipo y la calidad del asfalto y de los agregados pétreo es fundamental para garantizar un correcto comportamiento y funcionamiento de la carpeta asfáltica, esta investigación es el resultado del interés que se tiene por evaluar el efecto que distintos materiales pulverulentos pueden producir a la misma, permitiéndonos definir parámetros para decidir entre el empleo de uno u otro material ante distintas condiciones de trabajo como la humedad y la temperatura, proporcionando criterios de calidad más representativos que permitan obtener mezclas asfálticas más resistentes y duraderas.



INTRODUCCIÓN

Antecedentes

En México, la institución que ha sido pionera y que se ha encargado de la construcción de las vías terrestres más importantes del país, es la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Esta dependencia tuvo a su cargo desde su creación hasta los años setenta del siglo pasado, la construcción de las carreteras, autopistas, vías de ferrocarril, aeropuertos y puertos, que propiciaron y actualmente continúan apoyando el desarrollo de nuestro país.

A partir de los años ochenta, la privatización y la descentralización de los ferrocarriles, aeropuertos y puertos marítimos, sólo dejó a cargo de esta dependencia la construcción y conservación de la red federal de carreteras y autopistas de cuota.



Nuestra red carretera, se caracteriza por el empleo combinado de suelos, materiales pétreos y carpetas de rodadura de tipo asfálticas o de concreto hidráulico, con las que se absorben los esfuerzos inducidos por el paso de las cargas del tránsito.

Es indudable que el mal servicio que han prestado las obras viales en México se ha debido, en gran medida, al comportamiento y la durabilidad de las capas inferiores de apoyo, así como por las condiciones ambientales prevalecientes, principalmente de humedad.

El comportamiento de las capas que conforman la estructura del pavimento, está definido por la calidad de los materiales utilizados, el cual generalmente es analizado a través de consideraciones efectuadas durante la etapa de proyecto y el programa de ensayos de laboratorio. Sin embargo, en la práctica, la selección y aceptación de los materiales empleados para la formación de una capa cualquiera de la estructura del pavimento, se define en función de los requisitos de calidad establecidos para una obra.

Para las obras de la SCT, en los proyectos se ha considerado como obligatorio la aplicación de los requisitos de calidad establecidos en su normativa vigente, salvo en proyectos muy especiales y debidos a razones de uniformidad y para evitar mayores costos de las obras.

Los requisitos de calidad que generalmente se han aplicado a los materiales que se utilizan en terracerías, capas hidráulicas y carpetas asfálticas, son los que establecen las normas SCT vigentes, las cuales han tenido escasas modificaciones desde la primera versión contenida en las Especificaciones Generales de Construcción de la extinta SCOP, editadas en 1957.

El incremento del tráfico pesado originado por el desarrollo económico del país, ha impuesto sustanciales variaciones en las capas de mezcla asfáltica como consecuencia de las deformaciones producidas en el pavimento, lo que dio origen al empleo de diferentes materiales que permitieran conseguir carpetas asfálticas más estables ante las diferentes condiciones de trabajo más desfavorables.



Muchas carpetas asfálticas suelen fallar por problemas asociados al daño por envejecimiento antes que por las solicitaciones impuestas por los vehículos. Frente a esta problemática se han intentado soluciones en el diseño que consisten frecuentemente en aumentar el contenido de asfalto en las mezclas para lograr una película de asfalto de mayor espesor que envuelva a los pétreos y de este modo reducir el porcentaje de vacíos. Sin embargo, un exceso de asfalto suele derivar en exudaciones y escurrimientos, además de encarecerse el producto final.

Hoy en día resulta muy común el empleo de asfaltos modificados o a la incorporación de aditivos a las mezclas asfálticas para mejorar sus propiedades mecánicas. El empleo de caucho, siliconas, y recientemente el empleo de polvos minerales como el cemento o la cal, son ejemplos de las diferentes técnicas que se utilizan con mayor frecuencia para responder a las altas solicitaciones del tráfico.

En la Norma N-CMT-4-05-002/06 *Calidad de materiales asfálticos modificados* de la SCT, se definen tres tipos de polímeros y el hule molido de neumáticos como los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos, sin embargo los polvos minerales no se consideran como modificadores del asfalto por la Normativa, por lo que el uso de cualquier polvo mineral puede ser incorporado al asfalto siempre y cuando cumpla con los dos requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa indicados en la Norma N-CMT-4-04/08 *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*, el porcentaje en peso (máximo 10%, variable en función de la intensidad del tránsito y el tamaño nominal del agregado) y el equivalente de arena (50% como mínimo).

Hoy en día son conocidas las potenciales ventajas que el uso de algunos polvos minerales o filler proporcionan a la mezcla asfáltica; sin embargo, no se tiene la certeza de que las características físico-químicas particulares de estos influyan en el comportamiento del sistema bifásico filler-asfalto.

Por tal circunstancia, en esta investigación se propuso desarrollar una serie de estudios para la caracterización de 12 diferentes tipos de polvos minerales o filler, los cuales están presentes en los agregados pétreos comúnmente empleados para la fabricación de mezclas



asfálticas en las regiones de Michoacán y Jalisco, así como aquellos que son productos industrializados (cal, cemento, polvo calizo) que pueden ser incorporados para la elaboración de una mezcla asfáltica.

Los ensayos empleados en esta investigación siguieron una metodología con alto contenido experimental y se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Campus Morelia, y el laboratorio de asfalto de la empresa SURFAX S.A. de C.V. en la ciudad de Guadalajara.

Los ensayos fueron elegidos de manera tal que se permitiera determinar la mayoría de las características de cada filler, pero debido a que las pruebas involucraban objetivos muy específicos, se decidió hacer una agrupación de todas ellas en tres etapas de análisis.

En la primera etapa, se desarrolla una caracterización tradicional de cada filler mediante las pruebas y procedimientos que la norma SCT solicita para asegurar las proporciones y características de esta fracción pétreo.

La segunda etapa, contempla el desarrollo de una caracterización no convencional de cada tipo de filler a través de equipos modernos que se utilizan en el análisis de materiales aplicados a la industria metalúrgica, pero que por el tipo de parámetros a evaluar es posible emplear esos mismos equipos.

La tercera y última etapa, comprende un análisis del mástico (filler-asfalto) ante condiciones de susceptibilidad térmica, humedad y envejecimiento mediante el método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL[®]), así como el estudio del comportamiento reológico del mástico a través del Reómetro de Corte Dinámico (DSR).

Mediante los resultados obtenidos de cada una de las etapas anteriores, se tendrán parámetros de carácter físico-químicos y mineralógicos de esta fracción fina, los cuales no se evalúan o consideran actualmente para definir si se acepta o no este material para formar parte del esqueleto mineral de una mezcla asfáltica; así como también evaluar el desempeño y el efecto que cada uno de estos materiales produce en el asfalto.



Debido a que en la construcción de pavimentos flexibles, el tipo y la calidad del asfalto y de los agregados pétreo es fundamental para garantizar un correcto comportamiento y funcionamiento de la carpeta asfáltica, esta investigación es el resultado del interés que se tiene por evaluar el efecto que distintos materiales pulverulentos pueden producir a la misma, permitiéndonos definir parámetros para decidir entre el empleo de uno u otro material ante distintas condiciones de trabajo como la humedad y la temperatura, proporcionando criterios de calidad más representativos que permitan obtener mezclas asfálticas más resistentes y duraderas.



Contenido de la tesis

En el Capítulo 1 se muestra el panorama histórico del desarrollo en la construcción de las vías de comunicación pavimentadas, la evolución de la técnica y el mejoramiento en la elección de los materiales para conformar calzadas más resistentes, cómodas y duraderas. Posteriormente, se explican las características de los agregados pétreos y el cemento asfáltico empleados para la elaboración de mezclas asfálticas, se describe la mezcla asfáltica y las características necesarias de los materiales para un buen desempeño, resaltando la importancia que el mástico propicia a la misma.

En el Capítulo 2 se presentan las características físicas y químicas del filler, la importancia de su incorporación en las mezclas asfálticas, los efectos producidos en estas y las características deseables que debe de poseer para garantizar un adecuado desempeño con base en los resultados de algunas investigaciones similares. En este Capítulo, se resaltan los requerimientos normativos de la SCT para la selección de este material y la importancia que recibe en nuestro país.

En el Capítulo 3 se describen los ensayos realizados para la correcta caracterización físico-química del filler y la evaluación del efecto en la modificación de las propiedades mecánicas del asfalto. Las pruebas se encuentran separadas por el tipo de estudio realizado. El primer grupo de ensayos corresponden a la caracterización tradicional o especificada por la normativa SCT; el segundo grupo considera una serie de pruebas que no habían sido empleadas para la caracterización de esta parte mineral y que por sus resultados aportan información relevante para comprender y explicar el comportamiento del sistema bifásico filler-asfalto; el tercer grupo de ensayos considera la evaluación del sistema bifásico filler-asfalto ante condiciones de temperaturas variables, humedad y envejecimiento del asfalto, así como el análisis del comportamiento reológico del mástico formado con cada uno de los doce tipos de filler, empleando para un reómetro de corte dinámico para dicho análisis.



En el Capítulo 4 se presenta un breve análisis de los resultados obtenidos por cada una de las cuatro etapas de estudio que se plantearon para este proyecto, correlaciones y justificación de resultados obtenidos.

Posteriormente se presentan las Conclusiones de todo el proyecto, la respuesta a los objetivos generales planteados y algunas recomendaciones para la correcta selección del agregado pulverulento.

Así mismo, se incluye un apartado con las referencias bibliográficas que fueron consultadas para la realización de este proyecto de investigación.

Por último, en los anexos se integran los reportes con los resultados obtenidos de todas las pruebas realizadas en este proyecto por cada uno de los doce materiales analizados.



OBJETIVOS

Debido a la gran variedad y diferencia en las características físicas, químicas y mineralógicas que cada tipo de filler presenta, el objetivo general de la presente tesis se centra en evaluar y probar que el desempeño de una mezcla asfáltica se ve influenciado por el tipo y características del filler con que se elabora; así como la verificación de la idoneidad de los ensayos de control de calidad presentados en la normativa SCT para esta fracción fina.



Alcanzar el objetivo general de este trabajo, requiere de cumplir una serie de objetivos específicos que se describen a continuación:

- Recopilación de información existente en materia de control de calidad de materiales para mezclas asfálticas, características y limitaciones de los ensayos a realizar y la interpretación de resultados obtenidos por estos.
- Definir el número y tipo de materiales pulverulentos o filler a emplear para el desarrollo de la investigación.
- Cribado y preparación de los diferentes tipos de filler a emplear en los ensayos.
- Establecer el programa de pruebas de laboratorio a realizar.
- Interpretación, correlación y presentación de los resultados obtenidos por los ensayos realizados.

CAPÍTULO I

TECNOLOGÍA, DESARROLLO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS VÍAS DE COMUNICACIÓN PAVIMENTADAS

- I.1 Introducción
- I.2 Las carreteras Romanas
- I.3 Las carreteras antes del siglo XIX
- I.4 Las carreteras del siglo XIX
- I.5 Características de las carreteras pavimentadas en México.
- I.6 Agregados pétreos empleados en las mezclas asfálticas densas para carpetas
 - I.6.1 Propiedades físico-químicas y características de los agregados pétreos para mezclas asfálticas.
 - I.6.2 Clasificación, características y requisitos de calidad de los agregados pétreos para mezclas asfálticas densas según Normativa SCT
- I.7 Cementos asfálticos
 - I.7.1 Propiedades y características físico-químicas
 - I.7.2 Comportamiento mecánico y reológico del asfalto
 - I.7.3 Aspectos involucrados en el envejecimiento del asfalto
- I.8 Mezclas asfálticas
 - I.8.1 Principales características y comportamientos de las mezclas asfálticas.
 - I.8.2 Parámetros analizados en el diseño de mezclas asfálticas.



CAPÍTULO I

TECNOLOGÍA, DESARROLLO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS VÍAS DE COMUNICACIÓN PAVIMENTADAS.

I.1 Introducción

De acuerdo con Bañón et al., 2000, el aumento de tamaño y densidad de las poblaciones en las ciudades de las primeras civilizaciones y la necesidad de comunicación con otras regiones se tornó necesaria para hacer llegar suministros alimenticios o transportarlos a otros consumidores, es allí donde surgen las carreteras.

Desde la antigüedad, la construcción de vías de comunicación ha sido uno de los primeros signos de civilización avanzada. Probablemente los primeros constructores de caminos aplicaron su técnica en la región del Oriente, donde apareció la rueda y el animal de tiro. Es de suponer que sintieran la necesidad de allanar el terreno efectuando pequeños desmontes y rellenando depresiones.



La carretera más antigua de larga distancia de acuerdo con Zorio, 1987, fue la Carretera Real Persa (fig. I.1), que estuvo en explotación desde aproximadamente el año 3500 al 300 A. C. Esta carretera tenía inicio en Susa, continuaba hacia el noreste a Samosata donde cruzaba el río Éufrates y hacia el oeste llegaba a Boghas-koei (Hattusas), capital del reino Hitita; más al oeste, pasando por Ankara (Ancyra) llegaba a Sardis donde se bifurca a Éfeso y Esmirna. En Harran empezaba un ramal que conducía a Menfis (El Cairo) pasando por Palmira, Damasco, Tiro y Jerusalén.

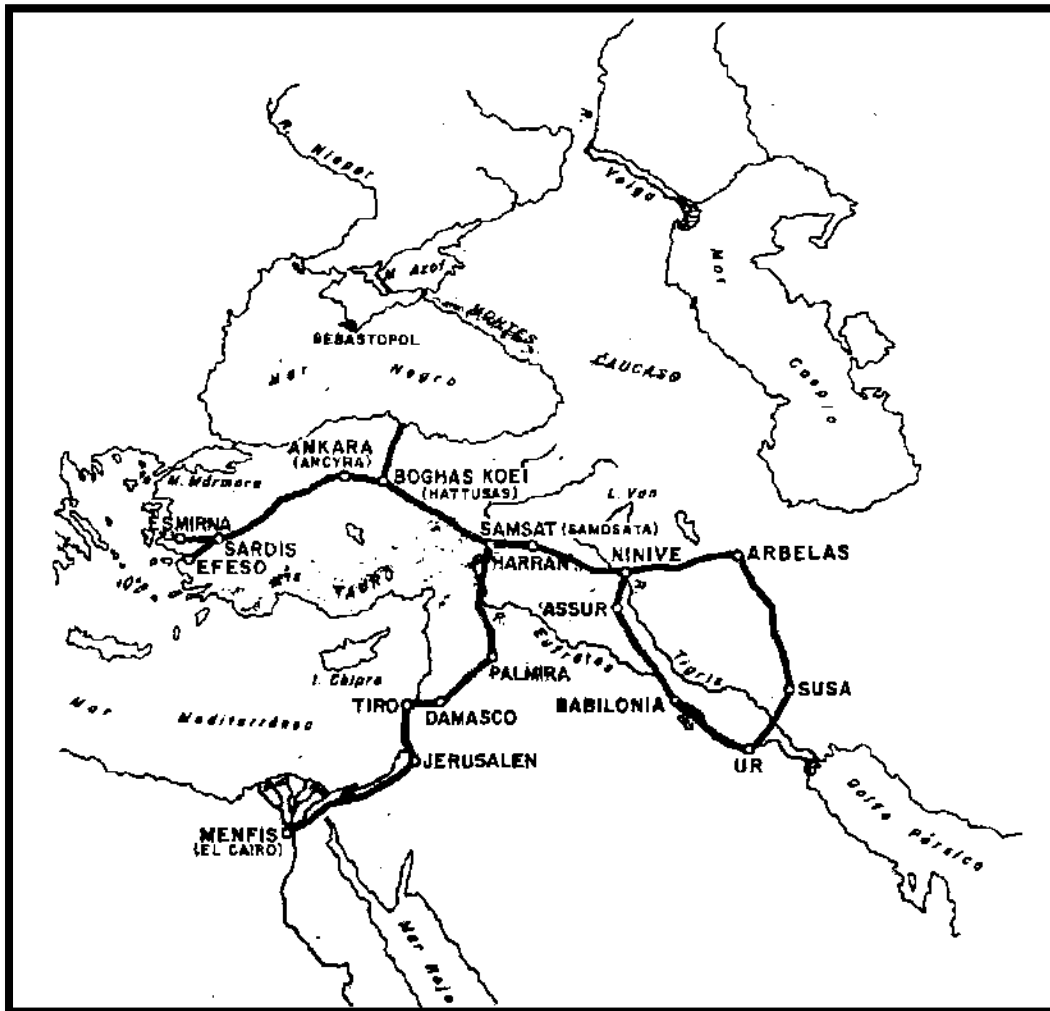


Fig. I.1 Carretera Real Persa, (fuente: Zorio, 1987).

Desde Susa a Esmirna la distancia era de 2,957 km, y según Herodoto, en el año 475 a. C., se requería de 93 días en recorrerla.

Antiguas carreteras, pero más modernas que la anterior (700-600 A. C.), unían palacios y templos en las ciudades de Assur, Babilonia, eran las carreteras procesionales (fig. 1.2).

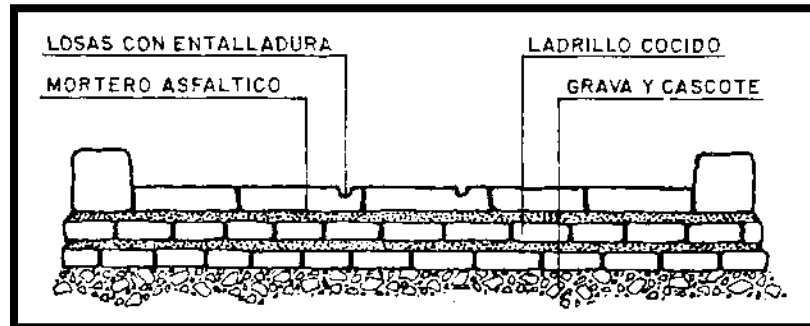


Fig. 1.2 Estructura de la carretera procesional en el templo de Ishtar, (fuente: Zorio, 1987).

Estas carreteras estaban construidas con ladrillo cocido y piedra unidos por mortero asfáltico. Aunque no servían al tráfico normal de caravanas, es posible que sean las precursoras de las calzadas romanas.

En China las Carreteras Imperiales coexistieron con la Carretera Real Persa. Jugaron un papel importante en el sustento de Asia, análogo al de las calzadas romanas en Europa y Asia Menor. Eran calzadas amplias, bien construidas y cubiertas con piedra, donde los ríos se cruzaban por medio de puentes o ferrys, los precipicios montañosos eran atravesados por escaleras de huella ancha y pequeñas contrahuellas. La longitud de la red era de unos 3,200 km y los principales centros de irradiación eran las ciudades de Sianfu, Nanking y Cheng-tu.

En la India también existió la construcción de carreteras, se sabe que en Baluchistan y en Penjab (país de los cinco ríos) en el periodo comprendido entre 3,250 y 2,750 A. C. las ciudades estaban pavimentadas con ladrillos cocidos y unidos mediante asfalto, a los que se le dedicaba un cuidado especial en la evacuación del agua. Como técnicas de construcción de pavimentos para el año 75 A. C., se conocían el pavimento de ladrillo, enlosado de piedra, un tipo de concreto empleado como capa de base o superficial, y los principios de relleno de las juntas mediante yeso, cal o mortero asfáltico.



En Europa existieron unas rutas que se utilizaron entre los años 1900 a 300 A. C. por los comerciantes Griegos y Etruscos para transportar ámbar y estaño desde el norte de Europa al Mediterráneo. No eran carreteras en el sentido moderno de la palabra, sino caminos naturales mejorados en el cruce de ríos y en el paso de montañas. Para conducir el tráfico por zonas pantanosas y húmedas (fig. I.3), se extendían dos o tres filas de troncos en el sentido de la marcha sobre un lecho de ramas finas y gruesas en una anchura de 6 m y cubriéndolas con troncos transversales extendidos de lado a lado. En los cruces de mejor calidad, había una fijación al suelo con estaquillas cada 5 ó 6 troncos.

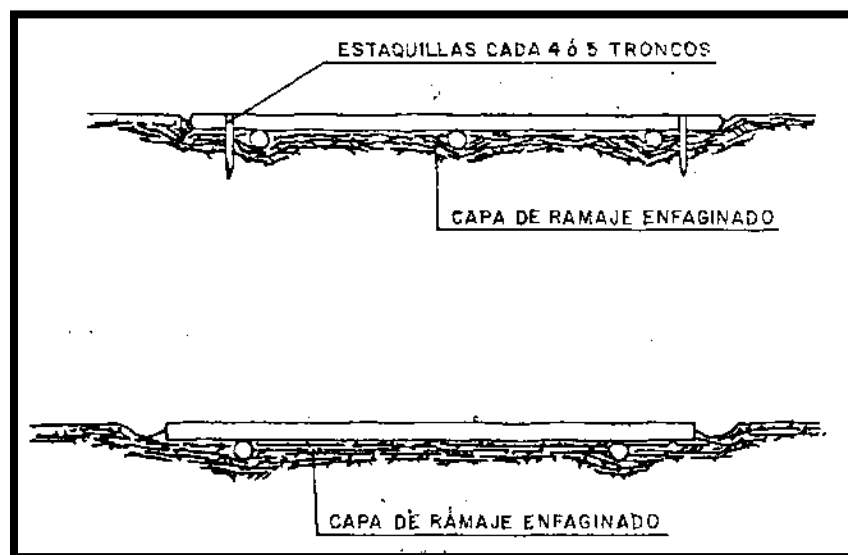


Fig. I.3 Características de los mejoramientos realizados para el cruce en zonas pantanosas y húmedas, (fuente: Zorio, 1987).

Siguiendo el orden cronológico, Gómez, 1970, nos dice que en la Isla de Malta se construyeron entre los años 2,000 y 1,500 A. C. carreteras de un carril único formadas por dos acanaladuras en V cortadas en la arenisca de coral de la Isla. Estas carreteras eran recorridas por carros con ruedas introducidas dentro de las muescas y arrastradas por hombres.

De acuerdo con Gómez, 1970, en Grecia existen carreteras sagradas con fines procesionales religiosos que datan del año 800 A. C. algunas de ellas son análogas (fig. 1.4) a las construidas mucho tiempo antes en la Isla de Malta.

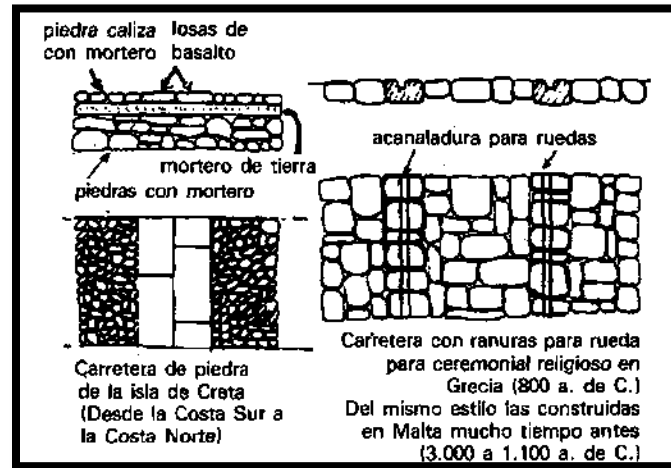


Fig. 1.4 Analogía de la construcción de carreteras pavimentadas en la Isla de Malta, Grecia y la Isla de Creta, (fuente: Gómez, 1970).

Gómez comenta que también quedan restos de carreteras en la Isla de Creta de la civilización minoica (año 3,000 a 1,100 a. C.). La carretera más importante es la que iba a Gortyna en la zona montañosa al sur de la isla (fig. 1.5) hasta Knossos situado en la costa norte.

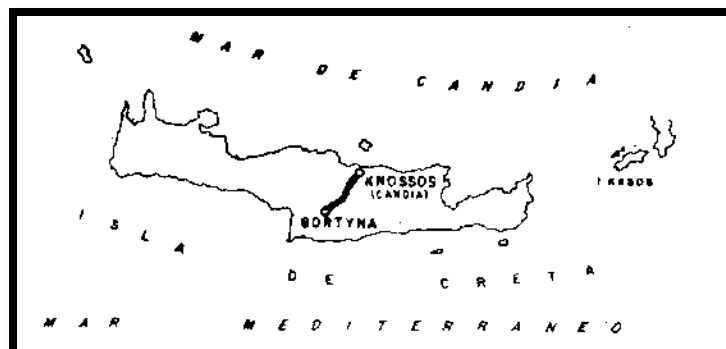


Fig. 1.5 Carretera más importante en la Isla de Creta durante el año 3,000 a 1,100a. C., (fuente: Gómez, 1970).

La calzada era de 3.6 m de ancho y la parte central estaba formada por dos filas de placas de basalto de un espesor de 5 cm unidas con arcilla y limo (fig. 1.6). Se cree que el centro de la carretera se usaba para el tráfico a pie y los bordes para el tráfico de animales y carros. Se tomó en cuenta el desagüe mediante la construcción de un perfil transversal inclinado y cunetas laterales de desagües.

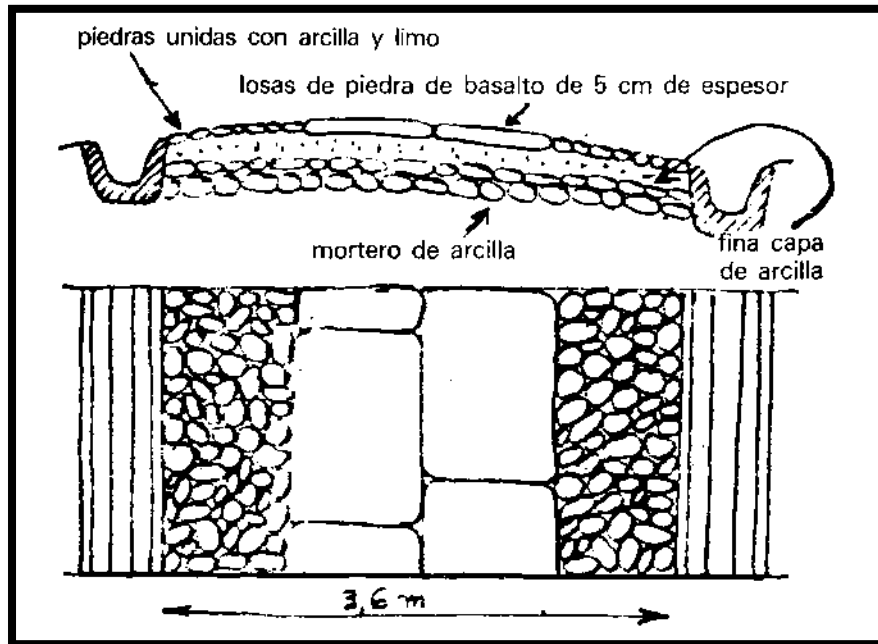


Fig. 1.6 Características del pavimento usado en la Isla de Creta, (fuente: Gómez, 1970).

Los Incas desconocían el uso de la rueda según Zorio, 1970, sin embargo construyeron dos caminos (fig.1.7) que iban desde Quito (Ecuador) al sur de Cuzco (Perú) estos caminos eran exclusivamente utilizados por peatones y animales de carga. Uno de los caminos seguía la costa, y tenía 3,600 km de longitud, el otro iba por la cordillera de los andes en un trazo de aproximadamente 2,640 km.

El camino de los andes es notable, pues tiene 7.5 m de ancho y atraviesa las más altas montañas con pendientes muy suaves mediante un trazado en zigzag, la construcción de terraplenes mediante una sólida mampostería y puentes colgantes sustentados por cuerdas echas de lana y fibras. La superficie de la calzada era de piedra en la mayor parte del trazado y se empleó el asfalto.

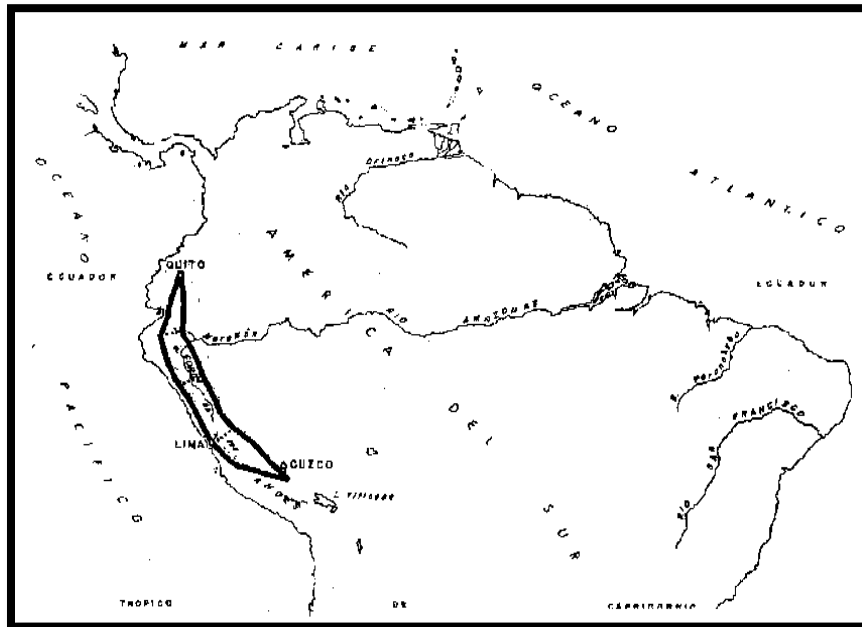


Fig. I.7 Carretera del Imperio Inca, (fuente: Zorio, 1970).

En rampas muy escarpadas se construían escalones tallados en la roca; atalayas construidas a lo largo de la carretera servían para un servicio de señalización visual a distancia. Por las características anteriores, es posible considerar que esta vía era una verdadera carretera, a pesar de que no transitaban carros.

La semejanza de estas carreteras con las chinas, hizo pensar en la posibilidad de una influencia cultural directa, aunque esta idea no ha sido comprobada.



I.2 Las carreteras Romanas

Los Romanos fueron los primeros que construyeron científicamente carreteras, llamadas comúnmente calzadas (de *calx*, *calcis*, piedra caliza) por la utilización de caliza en su construcción. Su técnica fue muy elaborada y su modelo de calzada adoptado hacia el año 300 a. C. fue el tipo estándar para los siguientes 2,000 años, (*fuentes: Rama, 2007*).

Existen diferencias de opinión respecto al origen de los métodos de construcción, pero todo parece indicar que los principales maestros de Roma en la técnica de construcción de carreteras fueron los Etruscos establecidos en el norte de Italia y probablemente también contribuyeron a la mejora los Cretenses, Cartagineses, Fenicios y Egipcios.

El Imperio Romano necesitó construir una amplia red de calzadas para mantener la comunicación entre las provincias y con la capital, la cual estaba unida con el vasto imperio por unos 85,000 km de carreteras. Las Calzadas Romanas fueron notables por su trazado rectilíneo, de punto a punto, sin reparar en obstáculos (pantanos, lagos, barrancos, montañas, etc.), conocían y dominaban la técnica de pilotes de madera para atravesar terrenos pantanosos. Su atrevida concepción sigue provocando admiración en la ingeniería moderna. El trazado tenía un número de curvas mínimo, lo que precisaba importantes obras de fábrica, ejemplos de las cuales son los magníficos puentes Romanos que todavía podemos contemplar, (*fuentes: Francisco Rama*).

La técnica Romana fue muy depurada, las características de cada pavimento dependían de la categoría, funcionalidad y la durabilidad que la carretera requería. Aunque en un principio el sistema carretero fue diseñado para fines militares y políticos, una vez construidas, estas adquirían una importancia económica, pues al unir distintas regiones, facilitaban el comercio y las comunicaciones.

Un ejemplo claro de una calzada de máxima calidad es la Vía Apia, la cual constaba de las siguientes partes (fig. I.8):

- Sobre el terreno natural se colocaba una capa de piedras planas que llamaban “Statumen” (de 25 a 60 cm de espesor), sobre las cuales se extendía una capa de detritus de cantera mezclado con cal, a lo que llamaban “Rudus” (de 22.5 cm de espesor)
- Una capa de piedra partida y aglomerada por cal grasa (cal con pequeñas cantidades de óxido de magnesio), la cual se denominaba “Nucleus” (de 30 cm de espesor) y hacia el efecto de lo que hoy conocemos como capa base.
- Un enlosado con mortero de cal, el cual se denominaba “Summundorsum o Summacruste” (de 15 cm de espesor), la cual hacía las veces de lo que hoy en día conocemos como carpeta (que incluye la capa de rodadura). La palabra “Dorsum” significa cresta, parte superior.

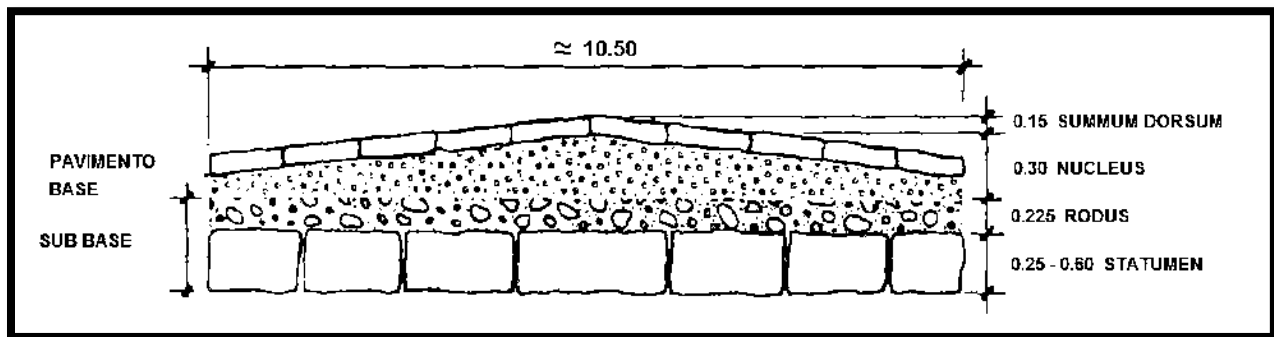


Fig. I.8 Estructura típica de una calzada de máxima calidad construida por los Romanos y su equivalente a la estructuración actual, (fuente: Rama, 2007).

En las calzadas de segunda categoría podía faltar el enlosado y solo contaban con las dos primeras capas. Había también estructuras tipo para calzadas de tercera categoría, las cuales estaban simplemente formadas por tierra.

Incluyendo todos los tipos de calzadas, el Imperio Romano llegaba a una longitud de su red carretera de 140,000 km, la cual requería mucha mano de obra no solo para su construcción sino también para su conservación, (fuente: Rama, 2007).



I.3 Las carreteras antes del Siglo XIX

De acuerdo con Barciela et al, 2005, durante el esplendor del Imperio Romano, el comercio constituyó un vínculo de unión entre las culturas de Europa, el norte de África, China e India. Los imperios Romano, Chino y Maurya (al norte de la India) cuidaban sus redes carreteras, pero cuando estos imperios declinaron, las rutas comerciales pasan a ser rutas de invasión y con ello las redes viales caen durante siglos en un completo abandono.

Los carros dejaron de ser el medio de transporte debido al pésimo estado de conservación de sus carreteras, cediendo el paso a las recuas de animales de carga que fueron suficientes para el reducido comercio de la época. En Europa, después de la caída del imperio Romano, las personas vivían aisladas en sus feudos y los viajes que realizaban solo eran con fines de guerra o peregrinación, pero siempre fueron realizados a pie o a caballo.

En el siglo XII se despierta un interés por los viajes terrestres. En el siglo XIII, el comercio por tierra a larga distancia experimenta un gran incremento. Es la época en que se restaura la ruta comercial entre Europa y China a través de Asia Central.

En Europa fueron los monasterios y los señores feudales quienes conservaban algunos puentes y tramos de calzada cobrando en ocasiones derecho de paso. Sin embargo al no existir un plan de conservación de caminos adecuado, las calzadas llegaron a ser intransitables, circunstancia que se vio agravada por la carencia de suspensión de los carros que apoyaban directamente su caja sobre el eje de las ruedas, debiendo soportar el viajero todos los impactos que la irregularidad de la superficie de rodadura provocaba.

Durante los siglos XV y XVI la pavimentación de las calles se hace popular. A pesar de que Francia fue la primera nación de los tiempos modernos que desarrollara un estudio sistemático de la construcción de caminos, el documento técnico más antiguo que se conoce sobre la construcción es una ordenanza policial de Julich-Berg que data del año 1554, donde se regula la reparación de caminos con piedras, madera y haces hallados en la proximidad.

En Francia pero durante el siglo XVIII, se crea la *Escuela de Ponts et Chaussées*, la primera escuela de ingeniería del mundo, y por vez primera, se incluyen los gastos de conservación de carreteras en el presupuesto del Estado. En esta misma época destacan tres personajes que innovan en el proceso de construcción de carreteras, Hubert Gautier, Jean-Rodolphe Perronet y Pierre-Marie-Jerôme Trésaguet.

Hubert Gautier escribió un *Traité des Ponts* que fue el libro modelo durante más de 70 años, y *Traité de la Construcción des Chemins* (1715), el cual es considerado el primer tratado moderno de construcción de caminos (*fuentes: Zorio, 1987*). En su tratado aconseja la estabilización de suelos arcillosos mezclándolos con grava, y como un dato curioso, no recomienda la compactación del terraplén formado con este material. Gautier proponía la misma sección de pavimento empleada en las Calzadas Romanas (fig. II.9), eliminando de ella la capa *Statumen* y *Nucleus*, conservando únicamente las capas de detritus de cantera (*Rudus*), sobre la cual se extiende el enlosado (*Súmmum Dorsum*).

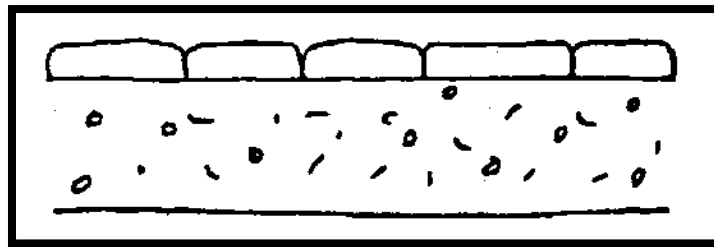


Fig. I.9 Sección de pavimento tipo propuesta por Huber Gautier, (*fuentes: Zorio, 1987*).

Jean-Rodolphe Perronet fue un gran constructor de puentes de arco en piedra, los que son ejemplo el puente Neuilly y el puente de la Concordia en París, originalmente llamado puente de Luis XV, fue nombrado director de la escuela Ponts et Chaussées al fundarse en 1747. Publicó sus memorias en 1782, el estudio de pavimentos en sí fue algo añadido a su ocupación principal, la construcción de puentes.

Pierre-Marie-Jerôme Trésaguet realizó una memoria en la que codificó la construcción de carreteras, en la reducía los espesores mediante la construcción de capas sucesivas de

piedra partida y de superficie dura (fig. II.10), la estructura que proponía es la siguiente:

- Una base de piedras gruesas hincadas a mano.
- Una capa de regulación con fragmentos de piedra, y
- Una capa de rodadura de un espesor de tres pulgadas formado por piedras del tamaño de una nuez dura.

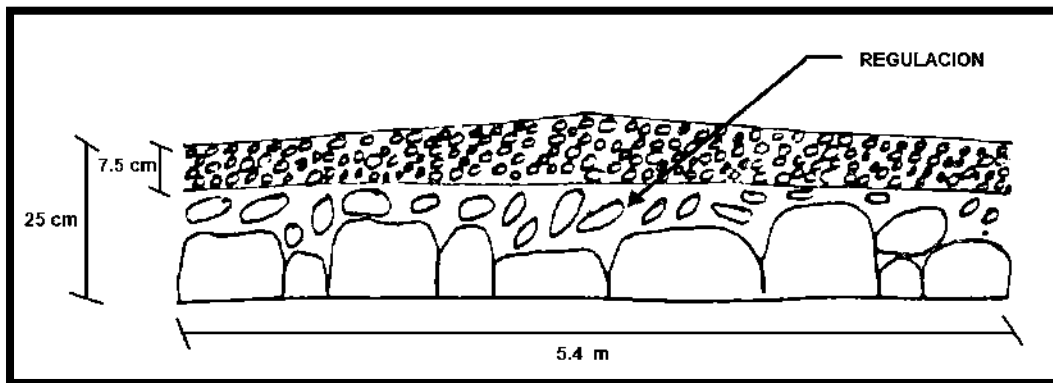


Fig. I.10 Sección de pavimento tipo propuesta por Pierre-Marie-Jerôme Trésaguet, (Zorio, 1987).

Su proyecto básico se empleó en una carretera de París a España vía Toulouse. Su modelo de pavimento se generalizó por Europa Central y Suecia. El ingeniero escocés Telford, de quien se comentará más adelante, adoptó algunas ideas de Pierre.

En Inglaterra John Metcalf contemporáneo de Trésaguet, fue el pionero de la construcción de carreteras, y sentó las bases de que pavimentos con buenos desagües era condición necesaria para tener una carretera durable.



I.4 Las carreteras del Siglo XIX

De acuerdo con Barciela et al, 2005, oficialmente se considera que entre los siglos XVIII y XIX aparecen dos técnicos en carreteras en Gran Bretaña, quienes son los creadores de la moderna técnica de construcción de pavimentos, Thomas Telford y Jonh Loudon McAdam. Aunque sus concepciones de la estructura del pavimento son distintas, coinciden en que el pavimento es algo continuo formado por agregados pétreos de distintos tamaños con capacidad de adaptación elástica.

Los pavimentos construidos durante esta época sustituyen los enlosados o adoquinados, que fueron los pavimentos clásicos desde las calzadas Romanas y que incluso Gautier había mantenido en su tratado de 1715. Únicamente Trésaguet (en 1775) había suprimido el enlosado superior.

Thomas Telford (1757-1834) nació en Westerkirk, Escocia, construyó numerosos puentes colgantes, acueductos, canales, trabajos portuarios, casas, túneles y carreteras. Construyó más de 1,500 km de carreteras, en las cuales mantuvo la un cimientto rígido formado por grandes piedras (fig.I.11).

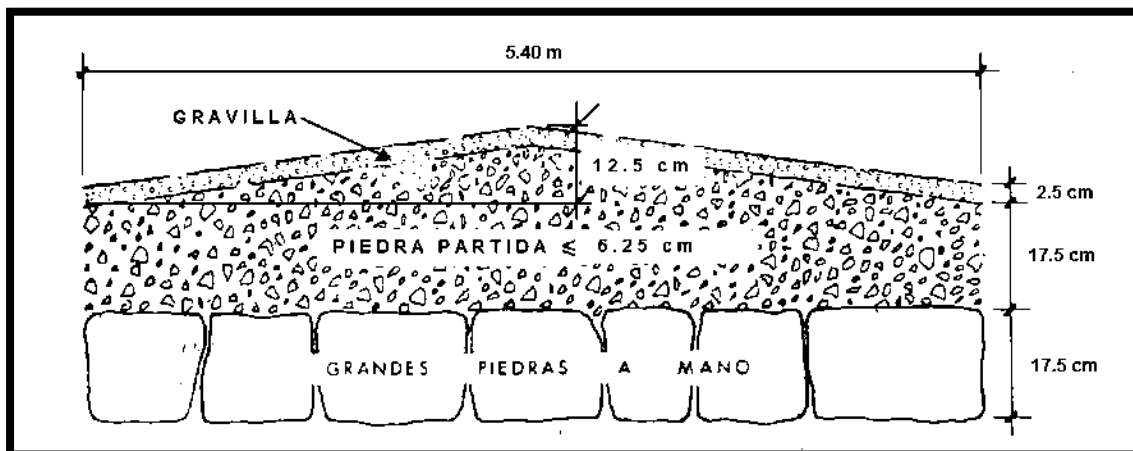


Fig. I.11 Sección de pavimento desarrollada por Thomas Telford, (fuente: Zorio, 1987).



El sistema de Telford implicaba cavar una zanja e instalar cimientos de roca pesada. Los cimientos se levantaban en el centro para que la carretera se inclinara hacia los bordes permitiendo el desagüe. La parte superior de la carretera consistía en una capa de 15 cm de piedra quebrada compacta.

Jonh Loudon McAdam (1756-1836), también escocés, recomendó que las carreteras se elevasen sobre el terreno adyacente para facilitar la evacuación de agua, McAdam aseguraba que la tierra bien drenada soportaría cualquier carga.

En el método de construcción de pavimentos para carreteras de McAdam (fig. I.12), la capa final de piedra quebrada se colocaba directamente sobre un cimiento de tierra que se elevaba del terreno circundante para asegurarse de que el cimiento desaguaba, sobre este se colocaba una capa de grandes rocas, en las cuales eran colocadas piedras de menor tamaño, y finalmente se unía la masa total con gravilla fina o escoria.

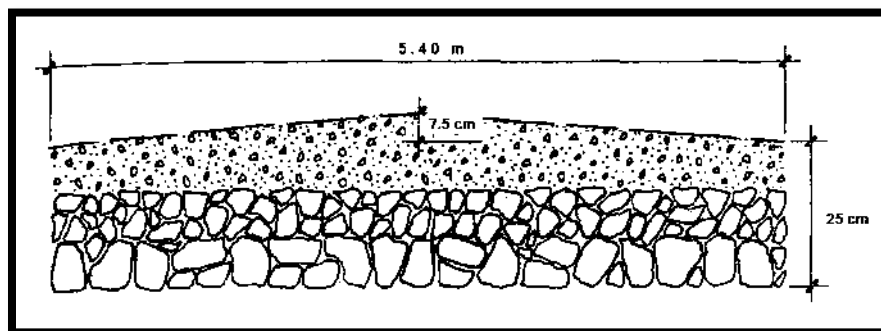


Fig. I.12 Sección de pavimento desarrollada por Jonh Loudon McAdam, (fuente: Zorio, 1987).

Para todo tipo de carga de aquella época, se consideró adecuado un espesor de pavimento de 25 cm. El sistema de McAdam, llamado macadamización, se adoptó en casi todas partes, sobre todo en Europa. Sin embargo, los cimientos de tierra de las carreteras macadamizadas no pudieron soportar los camiones pesados que se utilizaron en la I Guerra Mundial. Como resultado, para construir carreteras de carga pesada se adoptó el sistema de Telford, ya que proporcionaba una mejor distribución de la carga de la carretera sobre el subsuelo subyacente.



A principios del siglo XIX se comienzan a pavimentar calles utilizando alquitrán en riegos, dando origen a las primeras mezclas con alquitrán in situ, las cuales se construyeron en algunas calles de Londres y más tarde en zonas peatonales de la Puerta del Sol, Madrid, España, (*fuentes: Rama, 2007*).

Posteriormente, en Estados Unidos se emplearon mezclas fabricadas a partir de rocas asfálticas y de asfaltos naturales. Como consecuencia del desarrollo de la industria del petróleo, se comenzó a emplear los cementos asfálticos para la fabricación de mezclas asfálticas, siendo el norteamericano Richardson, quien estableciera las bases de la tecnología para las citadas mezclas, que en la actualidad son básicas para la pavimentación.

Sin embargo, el desarrollo tecnológico de estos materiales se produce durante la II Guerra Mundial, debido a las urgentes necesidades de construir pistas para los aeropuertos militares.

A finales del último tercio del siglo XX, se emplearon a gran escala innovaciones particularmente adaptadas a las necesidades urbanas, como son los microaglomerados, pavimentos drenantes, fonoabsorbentes, etc., los cuales además de su aportación estructural, proporcionan el aspecto de funcionalidad, (*fuentes: Vásquez, 2010*).

Actualmente algunos países y ciudades importantes, disponen de procedimientos (*sistemas de gestión*) específicos para la administración del presupuesto asignado a la conservación de la red carretera, y que basándose en una información básica (*características geométricas, secciones estructurales, tipos de tráfico, etc.*) y en la información del estado de los pavimentos, evolución de sus deterioros y en el comportamiento de las estructuras, permite a los ingenieros de conservación, definir los tratamientos adecuados para cada caso, orden de prioridad (*actuación inmediata o a medio o largo plazo*), valorar las correspondientes operaciones de conservación, coordinar y controlar las mismas, para así poder obtener el mejor aprovechamiento de los recursos disponibles y mantener un nivel de servicio adecuado, en este sentido, México no es la excepción de dichos procedimientos.



I.5 Características de las carreteras pavimentadas en México.

De acuerdo con Flores, 2004, el desarrollo de las vías de comunicación determina la evolución en la ocupación del territorio, además, condiciona el orden y el sentido del crecimiento de un país. México es un país en el cual la red carretera es su principal pilar de desarrollo, la mayor parte de las mercancías y pasajeros que se mueven a nivel nacional, lo realizan a través de esta red vial.

De acuerdo con el anuario estadístico de la SCT(2008), la extensión total de carreteras en la República Mexicana era de 366,807 km, las cuales se dividen en: Carreteras de la red federal, tanto libre de peaje como de cuota, con una extensión total de 48,844 km; las redes estatales de cuota y libres con una extensión de 78,267 km; la red de caminos rurales con una extensión de 165,558 km y finalmente el conjunto de brechas mejoradas con una extensión de 74,138 km. Esta red carreteras en conjunto, soporta la mayor parte de flujo de transporte de pasajeros (97.26 %) y poco más de la mitad del movimiento de mercancías (57.61 %).

Cabe mencionar que la evolución en la construcción de carreteras ha ido decreciendo, al pasar de un ritmo acelerado en la construcción entre los años 50 y 70, a un ritmo bastante inferior a partir de los ochenta y noventa. En total se consideran actualmente 14 corredores carreteros que comunican las principales zonas de producción industriales y agropecuarias, así como las más importantes localidades urbanas y centros turísticos. Estos ejes registran volúmenes diarios entre 2 mil y 30 mil vehículos. En la tabla 1.1 se aprecia el cuadro de resumen anual de la construcción de carreteras y el estado físico en que estas se encuentran.

Es importante destacar que la mayoría de las carreteras construidas en el país están conformadas por pavimentos flexibles, sin embargo, el estado físico en que la mayoría de éstas se encuentran presentan varias deficiencias, siendo la carpeta asfáltica la que presenta una mayor cantidad de problemas.



Tabla I.1 Longitud de la Red Nacional Carretera por tipo de camino, estado superficial y carriles, (fuente: Anuario estadístico de la SCT, 2008).

Red nacional carretera	1994	2000	2004	2005	2006	2007	2008	2009 ^R
Total	291 404	323 065	352 072	355 796	356 945	360 075	366 096	366 807
Por tipo de camino								
Federal	46 643	48 464	48 575	48 362	48 319	48 475	48 627	48 844
- Cuota ^a	6 294	6 598	7 423	7 409	7 558	7 844	8 064	8 335
- Libre	40 349	41 866	41 152	40 953	40 761	40 631	40 563	40 509
Estatal	56 062	64 706	75 217	71 032	72 179	73 874	77 912	78 267
Rural	138 163	149 338	165 132	163 516	167 877	171 157	166 415	165 558
Brechas mejoradas	50 536	60 557	63 148	72 886	68 570	66 569	73 142	74 138
Por estado superficial								
Pavimentado	93 868	108 488	116 923	122 678	123 354	127 173	132 729 ^R	136 157
Revestimiento	137 253	145 279	156 501	153 065	154 496	156 184	151 288	147 714
Terracerías	9 747	8 741	15 500	7 167	10 525	10 149	8 937 ^R	8 798
Brechas mejoradas	50 536	60 557	63 148	72 886	68 570	66 569	73 142	74 138
Por carriles								
Dos carriles	85 605	98 275	105 954	111 447	112 026	115 557	120 755 ^R	124 185
Cuatro o más carriles	8 263	10 213	10 969	11 231	11 328	11 616	11 974 ^R	11 972

Durante años, en todo el país la construcción de carpetas asfálticas como capa de rodadura de los pavimentos flexibles, se ha realizado mediante mezclas asfálticas de granulometría densa de elaboración en caliente, las cuales se encuentran sometidas a la creciente demanda de tránsito, a la acción de los agentes atmosféricos, a la presencia de altos y bajas temperaturas y al empleo de materiales inadecuados para su fabricación; ante la presencia de alguna o todas las condiciones anteriores, hacen que se presenten deterioros importantes en la carpeta asfáltica, tales como las deformaciones plásticas permanentes reflejadas por la aparición de roderas, agrietamientos por fatiga, agrietamientos por fatiga térmica y envejecimiento, y oxidación en la película delgada de cemento asfáltico que envuelve al material pétreo originado por los agentes atmosféricos.

Estudios recientes de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), revelan que una infraestructura carretera deficiente puede impactar negativamente hasta en un 5% el crecimiento de una economía, llegando a dañar a la industria, el turismo, el comercio y al mercado agroalimentario hasta en un 35%.

En la gráfica presentada en la fig. I.13, podemos ver que esto aplica con exactitud a nuestro país, dado que el 53% de la carga nacional y el 98% de los pasajeros se transporta a través de carreteras, de aquí que el estado, condiciones y cuotas en la red tengan un gran impacto en la competitividad de nuestro país.

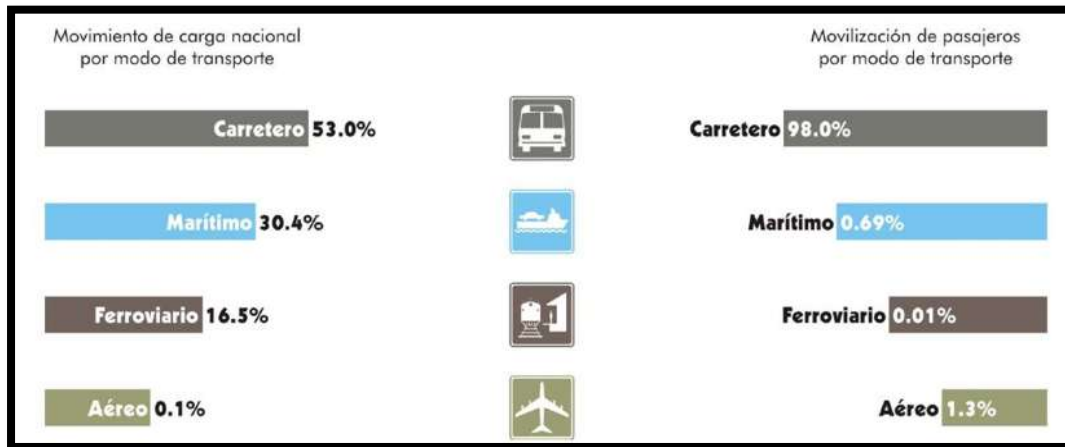


Fig. I.13 Movimiento de pasajeros y carga en México, (fuente: Anuario estadístico de la SCT 2008).

Sin embargo, nuestras carreteras no cuentan con esos elementos que las hagan seguras, transitables y accesibles, pues según el organismo internacional citado, entre un 30% y un 35% de la infraestructura carretera en nuestro país se encuentra en malas condiciones, requiriendo de mantenimiento mayor e incluso, en algunos tramos, de reconstrucción; esto, en adición a las altascuotas que se cobran a los usuarios.

Esto da origen a que los costos de transitar por estas vías, y por consiguiente, de los bienes de consumo, aumenten, afectando gravemente el crecimiento económico de nuestro país y nuestra capacidad de atraer inversiones y generar empleos.

En adición a lo anterior, se encuentra un aspecto aún más sensible, relacionado con el estado que guardan los caminos, puentes y autopistas en México, la pérdida de vidas humanas en accidentes carreteros, motivados en parte importante por fallas del conductor, la avería del vehículo y la falla de la infraestructura carretera.



De acuerdo a la Policía Federal de Preventiva (PFP), tan solo para el año 2009 existieron 29 596 siniestros en carreteras federales, dando origen a un aproximado de 17 defunciones y 107 lesionados por cada 100 accidentes, además de pérdidas materiales que superan los 1 mil 500 millones de pesos, esto sin considerar los gastos en atención médica de emergencia, rehabilitación física, incapacidades y pérdida de empleo, entre otros (resumen, ver tabla I.2).

Tabla I.2 Accidentes y sus saldos en carreteras de jurisdicción federal, (fuente: Anuario estadístico de la SCT 2008).

Concepto	1994	2000	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Accidentes	65 155	61 146	30 665	29 444	29 030	30 551	30 379	29 596
Daños materiales (millones de pesos)	669.8	1 835.6	1 248.3	1 303.1	1 407.0	1 515.2	1 581.6	1 519.4
Lesionados por cada 100 accidentes	56	63	102	110	114	110	108	107
Muertos por cada 100 accidentes	8	9	15	16	17	18	18	17

De acuerdo a la OCDE, aproximadamente 125 mil personas mueren cada año en las carreteras de las economías que integran esta Organización, lo que equivale a una muerte cada cuatro minutos en accidentes carreteros, constituyéndose así los siniestros en caminos y autopistas como la primera causa de muerte entre la población de entre 5 y 45 años de edad.

El mantenimiento, conservación y rehabilitación de carreteras en nuestro país, es el requisito indispensable para reducir los índices de siniestralidad. Por ello, la propia OCDE ha recomendado a México en reportes recientes, incrementar sus inversiones en el mantenimiento y rehabilitación de caminos y carreteras, particularmente en el aspecto preventivo, así como mejorar la calidad de los materiales empleados en las actividades de mantenimiento y conservación.

Lo anterior debido a una regla muy sencilla, ya que por un lado al emplear materiales de mejor calidad se disminuye en gran medida los gastos en mantenimiento mayor y, por otro lado, las labores de mantenimiento menor también se reducen e incrementaran la vida útil de la carretera.



De acuerdo a estudios citados en diversas iniciativas y puntos de acuerdo presentadas recientemente en el Senado de la República, la calidad de las carreteras mexicanas ha disminuido en la últimas dos décadas, en tanto que el costo de mantenimiento se ha incrementado drásticamente. Así, mientras en la década de los noventas la vida útil de una carretera en México era de 6 años y el costo de mantenimiento por kilómetro promediaba los 250 mil pesos; en la actualidad, la mala calidad de los materiales y la deficiente planeación en cuanto al aforo vehicular, el trazo de las rutas y la sobrecarga, han generado que el costo de mantenimiento ascienda a 5 millones de pesos por kilómetro, en tanto que la necesidad de mantenimiento mayor y/o rehabilitación se ha venido presentando al año de inaugurada la obra.

En atención a lo anterior, es clara la necesidad de mejorar en el control de calidad de los materiales empleados para la elaboración de las carpetas asfálticas. La SCT tiene parámetros normativos específicos para cada material que conforma una mezcla asfáltica, sin embargo existen condiciones inherentes al constructor en que la clase de material del que se dispone para realizar la construcción, no cumple con los parámetros señalados normativamente, y traerlos desde otras regiones supone un gran sobrecosto para la obra, por lo que resulta necesario evaluar bajo qué condiciones este material puede ser aprovechado o de qué manera podemos obtener un buen desempeño del mismo.



I.6 Agregados pétreos empleados en las mezclas asfálticas densas para carpetas

La manera más común de hacer uso del asfalto en la elaboración de carpetas para caminos, es mezclándolo con un agregado pétreo de características conocidas. Los agregados constituyen desde un 88% al 96% del peso de una carpeta asfáltica, y poco más del 75% del volumen del mismo. Los agregados pétreos, desempeñan una de las funciones más importantes dentro de la carpeta asfáltica, ya que contribuyen a la estabilidad mecánica, el soporte y transferencia de las cargas impuestas por el tránsito de manera disipada a las capas inferiores en la estructura del pavimento, (*fuentes: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, 1982*).

Por las características y consideraciones que deben de desempeñar, estos materiales deben ser de calidad uniforme, triturados a tamaño según sea necesario, deben de estar compuestos de piedras sólidas y duraderas o fragmentos de roca o escoria, con o sin arena u otro agregado mineral inerte y cuidadosamente dividido.

De acuerdo con los antecedentes del diseño y análisis de las mezclas asfálticas del SUPERPAVE, el comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante. El 100% de los concretos asfálticos que se elaboran en México, ocupan para su fabricación agregados que pueden ser obtenidos de diferentes fuentes. De acuerdo con la norma N.CMT.4.04/08 de la SCT, los agregados pétreos se pueden clasificar con base en la procedencia y a la técnica empleada para su aprovechamiento, los cuales son:

a. Agregados Naturales (ríos, playas, etc.).

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.

De acuerdo con Padilla (2004), desde un punto de vista práctico, los agregados pétreos se pueden clasificar en tres grandes grupos: agregados calizos, agregados silíceos y agregados ígneos y metamórficos.

▣ Agregados Calizos.

La roca caliza es muy común, abundante y económica en los procesos de trituración, se emplea generalmente en todas las capas de los firmes, exceptuándose en algunas ocasiones como agregado grueso en las capas de rodadura, debido a la facilidad que tiene de pulimentarse en condiciones de servicio, su carácter es básico, presenta por lo regular menores problemas de adhesividad, es decir, de afinidad con el asfalto.

▣ Agregados Silíceos.

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



▣ **Agregados Ígneos y Metamórficos.**

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

Desde el punto de vista de su tamaño, y de acuerdo con el manual M.MMP.4.04.002/02 de la SCT, los agregados pétreos para mezclas asfálticas se dividen en dos grupos: los agregados gruesos y los agregados finos. Los primeros consisten en partículas naturales o manufacturadas con tamaños mayores de 4.75 mm y hasta 50 mm; los segundos son aquellos cuyo tamaño de partículas son menores a 4.75 mm. Dentro de esta fracción fina, se encuentran las partículas inferiores a 0.075 mm, a las que se le conoce con el nombre de polvo mineral o filler. Con base en lo anterior, los agregados granulares utilizados en la construcción de carpetas asfálticas se pueden clasificar de la siguiente manera:

a. Gravas (4.75 mm – 50 mm).

Es el producto de la desintegración de grandes rocas. Son partículas más grandes que las de las arenas; el punto de división es el de la maya #4. Cabe mencionar que existen diferentes tipos de grava, siendo clasificados de acuerdo a su grado de pureza, tamaño y la fuente de donde fue obtenida entre estos tipos tenemos: gravilla, grava de río y grava de banco.



b. Arenas (0.075 mm – 4.75 mm).

Es el material granular fino resultado de la desintegración natural de las rocas o del triturado de agregado grueso. Existiendo varias definiciones de tamaños para las partículas de arenas. La más común define a la arena como aquel material granular que pasa la malla #4 y se retiene en la malla #200.

c. Polvo Mineral (*filler*).

El polvo mineral o filler es un material cuyo tamaño de partículas pasan por la malla #200 (0.075 mm). El término “filler” proviene del inglés y significa “rellenador”, debido a que inicialmente se le consideraba a este como un material de relleno de vacíos. Este concepto ha evolucionado y actualmente se le considera no solo como un inerte relleno sino como un material que al mezclarse con el asfalto desempeña cierta actividad que modifica algunas de las propiedades del sistema.

En muchos casos, algunos de los tipos de agregados aquí mencionados, se combinan para obtener una graduación con ciertas características deseadas para un uso en particular. En otros casos un solo agregado puede tener una graduación satisfactoria. La graduación del agregado es importante, pues determina, en la mayoría de los casos, la estabilidad mecánica de una mezcla de asfaltos, (*fuentes: Padilla, 2004*).



I.6.1 Propiedades físico-químicas y características de los agregados pétreos para mezclas asfálticas.

Cuando se emplean los agregados pétreos para la construcción de carpetas asfálticas, se consideran algunos aspectos fundamentales para garantizar un buen desempeño a la hora de estar en funcionamiento.

A través de las exigencias de calidad para los agregados pétreos, especificadas en la normativa vigente, se busca contar con materiales que cumplan con características físico-químicas y mineralógicas adecuadas, por lo que las principales características que se deben tener en cuenta en los agregados para la construcción de carpetas asfálticas de acuerdo con Padilla(2004), son las siguientes:

a. Forma y angulosidad.

La forma de las partículas del agregado grueso afecta fundamentalmente, al esqueleto mineral. Según su forma, las partículas pueden clasificarse en redondeadas, irregulares, angulares, lajeadas, alargadas y alargadas-lajeadas. (fig. I.14).

Las lajeadas y alargadas-lajeadas (agujas), pueden romperse con facilidad durante la compactación o después bajo la acción del tráfico, modificando con ello la granulometría del agregado inicial. Imponer limitaciones en el contenido de partículas de mala forma, es una acción que nos permite prevenir la modificación de la granulometría y contar con las proporciones exactas del esqueleto mineral para resistir las acciones del tráfico.

Aparte de la forma de las partículas del agregado grueso, se debe tener en cuenta su angulosidad, que influye junto a la textura superficial de las partículas, en la resistencia del esqueleto mineral, por su contribución al rozamiento interno.

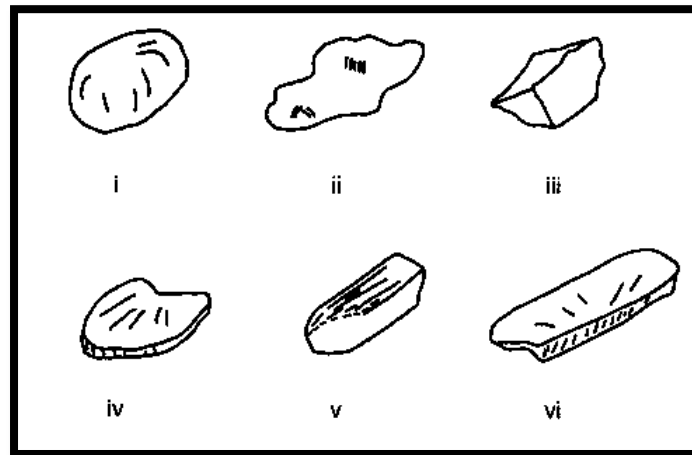


Fig. I.14 Forma de las partículas de agregado pétreo.

i. Redondeada, ii. Irregular, iii. Angular, iv. Lajeada, v. Alargada, vi. Alargada-Lajeada
(Fuente: Padilla, 2004)

Los agregados pétreos generalmente más deseados para la elaboración de mezclas asfálticas son aquellos con una alta proporción de partículas aproximadamente equidimensionales (cuboides). Los factores intrínsecos, como la composición de la roca afectan a la forma de los agregados durante los procesos de trituración.

b. Resistencia al desgaste.

La resistencia mecánica del esqueleto mineral es un factor predominante en la evolución del comportamiento de una carpeta asfáltica después de su puesta en servicio. La evaluación de dicha resistencia se realiza mediante diversos ensayos de laboratorio; sin embargo, ninguno de ellos caracteriza el estado tensional del agregado en el conjunto del pavimento. Se realizan una serie de ensayos que tienden a reproducir en laboratorio de manera más sencilla el comportamiento que luego tendrán los agregados en servicio, para ello se preparan las muestras con granulometrías próximas a las que van a ser puestas en obra, sometidas aun desgaste que, de forma indirecta, proporciona información de la resistencia mecánica del material. La prueba de Los Ángeles es un ejemplo de este tipo de ensayos.



c. Resistencia al pulimento.

La resistencia al pulimento de las partículas del agregado, es la resistencia a perder aspereza en su textura superficial, tiene gran importancia desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento cuando dichas partículas van a ser empleadas en una capa de rodadura. Para su evaluación se han desarrollado los ensayos de pulimento acelerado.

d. Adhesividad y resistencia al desplazamiento.

La adhesividad de los agregados pétreos con el cemento asfáltico es de gran importancia, debido a que se pueden presentar fenómenos físico-químicos en la superficie de los agregados empleados en las capas del pavimento.

En estos fenómenos complejos intervienen tanto factores físicos como la textura del agregado, la porosidad del mismo, viscosidad y tensión superficial del asfalto, espesor de la película de asfalto, etc. y a su vez factores químicos relativos al asfalto y al agregado.

Si los agregados están absolutamente secos, se dejan mojar fácilmente por el cemento asfáltico; sin embargo la situación es muy diferente con algo de humedad que siempre puede existir, ya que la superficie del agregado se polariza con un signo u otro dependiendo de su naturaleza. Atendiendo a ese criterio, los agregados se clasifican en ácidos y básicos, y los efectos que implica utilizar materiales de estas naturalezas son muy diferentes.

e. Agregados Ácidos.

La acidez es por lo general consecuencia de un alto contenido en sílice y determina una gran afinidad del agregado por el agua (hidrofilia) y una polaridad negativa. La adhesividad entre los agregados silíceos (o ácidos en general) y el cemento asfáltico no es buena, pudiendo llegar a ser necesaria la disminución de la tensión superficial del asfalto mediante procesos de activación en los que se carga electropolarmente para crear una adhesividad.



f. Agregados Básicos.

Son menos hidrofílicos que los silíceos y se cargan positivamente en presencia de agua. Porello pueden presentar cierta atracción por los ácidos libres en el asfalto y, en consecuencia una mejor adhesividad con los mismos.

En las carpetas asfálticas además de cuidar y verificar que el cemento asfáltico moje al agregado, se debe tener en cuenta la posibilidad de que el agua en combinación con la acción de los vehículos y en ocasiones con el polvo y suciedad existentes, perturbe la adhesividad, desplazando el asfalto de la superficie del agregado, que quedará de nuevo descubierta o lavada.

La adhesividad pasiva o también llamada resistencia al desplazamiento de asfalto dependerá de los mismos factores químicos y físicos anteriormente citados: afinidad polar por el asfalto, espesor de la película y viscosidad del mismo, tensión superficial (ángulo de contacto) y textura superficial.

g. Plasticidad y limpieza.

Para que un agregado pétreo se comporte adecuadamente dentro de cualquier capa de pavimento, debe estar completamente limpio, libre de partículas orgánicas, polvo o arcillas.

Se establece en las normativas, que todos los finos deben tener reducida su plasticidad e incluso que no sean plásticos en la mayoría de los casos. Las fracciones gruesas deben estar exentas de polvo, fijando los límites admisibles a través del denominado índice de plasticidad.

Se debe garantizar que en presencia de agua, la capa en cuestión conserve sus características resistentes y que, en su caso, no haya problemas de adhesividad con el asfalto. En ocasiones aunque el agregado fino no sea plástico, puede estar contaminado por partículas no arcillosas, que no se hayan podido detectar mediante los límites de Atterberg, pero igualmente nocivas. Un ensayo muy utilizado para caracterizar desde este punto de vista el agregado fino es el denominado Equivalente de Arena.



h. Alterabilidad.

Los fallos detectados en un pavimento al poco tiempo después de su puesta en servicio, comúnmente suelen ser ocasionados por procesos de alteración de los agregados en alguna de sus capas, los cuales pueden desencadenarse debido a alguna reacción química con alguno de los componentes del asfalto o conglomerantes, por la acción de la helada o, simplemente, por la siempre inevitable presencia de agua.

Existe la necesidad de evaluación de la alterabilidad de un agregado pétreo por el procedimiento que sea, y se pueden señalar a título indicativo, los siguientes caminos: análisis petrográficos, acción de soluciones salinas o de agua oxigenada, ciclos hielo-deshielo, inmersión en agua y ciclos de humedad–sequedad.

i. Resistencia al desprendimiento.

Los defectos de adhesión significan la quiebra de las fuerzas de unión entre el agregado y su cubierta de conglomerante asfáltico, lo que conduce a una separación física, una posible consecuencia de los defectos de adhesión, es el fallo mecánico por desgaste y desflorado de la superficie, pero el fallo mecánico no se produce inmediatamente después del fallo de adhesión, si el desprendimiento, aunque sea permanente, se produce a un nivel inferior de la construcción y el grado de entrecruzamiento físico de las partículas de agregado es suficiente para resistir el esfuerzo del tráfico. Dado que el desprendimiento es un fenómeno asociado a la presencia de agua. Se deduce que los pavimentos densos, de bajo contenido de vacíos, son prácticamente inmunes y que el comportamiento de los agregados pétreos en los ensayos de deslizamiento es bastante irrelevante en dicho uso.

j. Aptitud para contribuir a la resistencia y rigidez de la mezcla en conjunto.

Esta propiedad se refiere tanto a los agregados gruesos, finos y polvo mineral; siempre que se cumpla que la resistencia y durabilidad intrínseca de las partículas del agregado es la adecuada a las propiedades de la masa de agregados de entrecruzado y rozamiento interno.



Independientemente del origen de los agregados, estos presentan propiedades físicas macroscópicas que los caracterizan; la dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, módulo elástico, conductividad térmica, dilatación, etc., son parámetros que se pueden determinar mediante ensayos, y nos proporcionan los elementos necesarios para determinar si un agregado es adecuado o no para desempeñarse adecuadamente dentro de una mezcla asfáltica.

A este respecto tanto la angularidad como la irregularidad de la textura superficial contribuyen en gran medida a las resistencias mecánicas y a la deformación de la mezcla asfáltica.

La exigencia anterior podría cuestionarse considerando que en las plantas asfálticas modernas existen poderosos sistemas para extraer el polvo e impurezas del agregado. Sin embargo en una secuencia lógica de exigencias de calidad y prevenciones, la limpieza inicial del agregado está totalmente justificada, (*fuentes: Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, 1982*)



I.6.2 Clasificación, características y requisitos de calidad de los agregados pétreos para mezclas asfálticas densas según normativa SCT.

Como requisito del control de calidad para garantizar un adecuado desempeño de las mezclas asfálticas elaboradas en México, el material pétreo que se utiliza en la elaboración de estas debe cumplir con una serie de requisitos indicados en la norma N.CMT.4.04/08 *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*.

Los materiales pétreos que comprende dicha norma, los clasifica como materiales naturales seleccionados o sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado, a fin de que garantice la ausencia de material orgánico.

Según el tipo de mezcla asfáltica en el que los agregados se vayan a utilizar, los materiales pétreos se clasifican como se indica a continuación:

- k. Materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa.
- l. Materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría abierta.
- m. Materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA.
- n. Materiales pétreos para mortero.
- o. Materiales pétreos para carpetas por el sistema de riegos.
- p. Materiales pétreos para mezclas asfálticas para guarniciones.

Las mezclas asfálticas de granulometría densa son las más comúnmente empleadas para la elaboración de una carpeta asfáltica. En este tipo de mezclas, la norma nos define los parámetros granulométricos y requisitos de calidad del material en función del tamaño nominal del agregado con que se elaborara la mezcla asfáltica y del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de ocho punto dos toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento.



a. Requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa para menos de 1 millón de ejes equivalentes (8.2 Ton) acumulados.

Cuando el tránsito esperado sea igual a 1 millón de ejes equivalentes o menor, la norma solicita que el material pétreo cumpla con las características granulométricas que se establecen en la tabla I.3 siguiente.

Tabla I.3 Requisitos granulométricos para cuando el tránsito esperado sea igual o menor a un millón de ejes equivalentes, (fuente: Norma N.CMT.4.04/08 de la SCT).

Malla		Tamaño nominal del material pétreo				
		mm (in)				
Abertura mm	Designación	9.5 ($\frac{3}{8}$)	12.5 ($\frac{1}{2}$)	19 ($\frac{3}{4}$)	25 (1)	37.5 ($1\frac{1}{2}$)
50	2"	---	---	---	---	100
37.5	$1\frac{1}{2}$ "	---	---	---	100	90 – 100
25	1"	---	---	100	90 – 100	76 – 90
19	$\frac{3}{4}$ "	---	100	90 – 100	79 – 92	66 – 83
12.5	$\frac{1}{2}$ "	100	90 – 100	76 – 89	64 – 81	53 – 74
9.5	$\frac{3}{8}$ "	90 – 100	79 – 92	67 – 82	56 – 75	47 – 68
6.3	$\frac{1}{4}$ "	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



Adicional a los requisitos granulométricos anteriores, la norma exige que estos cumplan con los requisitos de calidad que se indican en la tabla I.4, y recalca que no podrán utilizarse materiales entre una granulometría y otra.

Tabla I.4 Requisitos de calidad del material pétreo para cuando el tránsito esperado sea igual o menor a un millón de ejes equivalentes, (fuente: Norma N.CMT.4.04/08 de la SCT).

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

Si el tránsito esperado resulta ser mayor a un millón de ejes equivalentes, no son aplicables estos requisitos granulométricos y de calidad, por lo que se deben de considerar las especificaciones indicadas en el inciso siguiente, las cuales son aplicables para cualquier valor de ejes equivalentes.

b. Requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa para cualquier valor de ejes equivalentes (8.2 Ton) acumulados.

Cuando el tránsito esperado sea mayor a 1 millón de ejes equivalentes o menor, o haya resultado cualquier valor, la norma solicita que el material pétreo cumpla con las características granulométricas que se establecen en la tabla I.5 siguiente.



Tabla I.5 Requisitos granulométricos para cuando el tránsito esperado sea mayor a un millón de ejes equivalentes o tenga cualquier valor, (fuente: Norma N.CMT.4.04/08 de la SCT).

Malla		Tamaño nominal del material pétreo <i>mm (in)</i>				
Abertura <i>Mm</i>	Designación	9.5 ($\frac{3}{8}$)	12.5 ($\frac{1}{2}$)	19 ($\frac{3}{4}$)	25 (1)	37.5 ($1\frac{1}{2}$)
50	2"	---	---	---	---	100
37.5	1 $\frac{1}{2}$ "	---	---	---	100	90 – 100
25	1"	---	---	100	90 – 100	74 – 90
19	$\frac{3}{4}$ "	---	100	90 – 100	79 – 90	62 – 79
12.5	$\frac{1}{2}$ "	100	90 – 100	72 – 90	58 – 71	46 – 60
9.5	$\frac{3}{8}$ "	90 – 100	76 – 90	60 – 76	47 – 60	39 – 50
6.3	$\frac{1}{4}$ "	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

Adicional a los requisitos granulométricos anteriores, la norma exige que estos cumplan con los requisitos de calidad que se indican en la tabla I.6.



Tabla I.6 Requisitos de calidad del material pétreo para cuando el tránsito esperado sea mayor a un millón de ejes equivalentes o tenga cualquier valor, (fuente: Norma N.CMT.4.04/08 de la SCT).

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

Hasta aquí son los parámetros que la norma SCT exige para los agregados pétreos, y como nos damos cuenta, para la fracción fina solo la restringe mediante dos parámetros: el porcentaje en peso y el valor de equivalente de arena, los cuales como podemos apreciar, es relativamente fácil que un material altamente arcilloso cumpla con estos dos parámetros.

I.7 Cementos asfálticos.

El asfalto que se utilizó en épocas pasadas fue el asfalto natural; el cual se encuentra en la naturaleza en forma de yacimientos que pueden explotarse sin dificultad y cuyo empleo no requiere de operaciones industriales de ningún tipo para su preparación. Estos yacimientos se han producido a partir del petróleo por un proceso natural de evaporación de las fracciones volátiles dejando las asfálticas. A este asfalto se le llama frecuentemente asfalto de lago. Los yacimientos más importantes de asfaltos naturales se encuentran en los lagos de Trinidad, en la isla de Trinidad en la costa norte de Venezuela. Casi siempre se encuentran en las rocas asfálticas, que son rocas porosas saturadas de asfalto, (fuente: *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*, 1982).



Sin embargo, se puede obtener artificialmente como producto de la refinación del petróleo, el petróleo es un producto natural localizado a grandes profundidades de la corteza terrestre, es una compleja mezcla de un importante número de hidrocarburos, y que por medio de una destilación fraccionada es dividida en pequeños grupos de estos hidrocarburos de volatilidad diferente, donde las cantidades de asfalto residual varían según las características del crudo; pudiendo oscilar entre el 10 y el 70%. Este asfalto se produce en una variedad de tipos y grados que van desde sólidos duros y quebradizos a líquidos casi tan fluidos como el agua. La forma semisólida conocida como cemento asfáltico es el material básico.

De acuerdo con Padilla, 2004, el proceso de destilación fraccionada o refinación del crudo (Figura I.15), comienza con su llegada en tanques cilíndricos, desde donde es bombeado a las unidades de destilación primaria, después de la deshidratación y desalación. El petróleo se hace circular por el interior de un horno alcanzando elevadas temperaturas, donde se vaporiza parcialmente para luego pasar a la torre atmosférica, en la cual, por diferencia de temperaturas de condensación (punto inicial y punto final), se obtiene las fracciones más livianas, como los gases de cima, la nafta, el JP-A (combustible para avión), el queroseno y el gasóleo atmosférico. Los elementos más volátiles alcanzan los niveles más altos de las torres y los más pesados no logran ascender.

El crudo residual constituido por los componentes más pesados del petróleo y que no se lograron vaporizar a estas condiciones de presión y temperatura, pasan a una destilación al vacío donde se recuperan los gasóleos de vacío. En el fondo de la torre de vacío, se obtienen los residuos finales de esta destilación; que se conoce con el nombre de fondos de vacío.

Si las características del crudo de alimentación son adecuadas, estos fondos de vacío son empleados directamente como asfalto para pavimentación; en caso contrario, el fondo es sometido a otros procesos. Se somete a tratamiento con disolventes de desasfaltado, donde se extraen un poco más de gasóleos. También se puede someter al soplado con aire u oxidado, cuando es necesario deshidrogenar e incrementar la viscosidad del residuo con el fin de cumplir con unas especificaciones dadas.

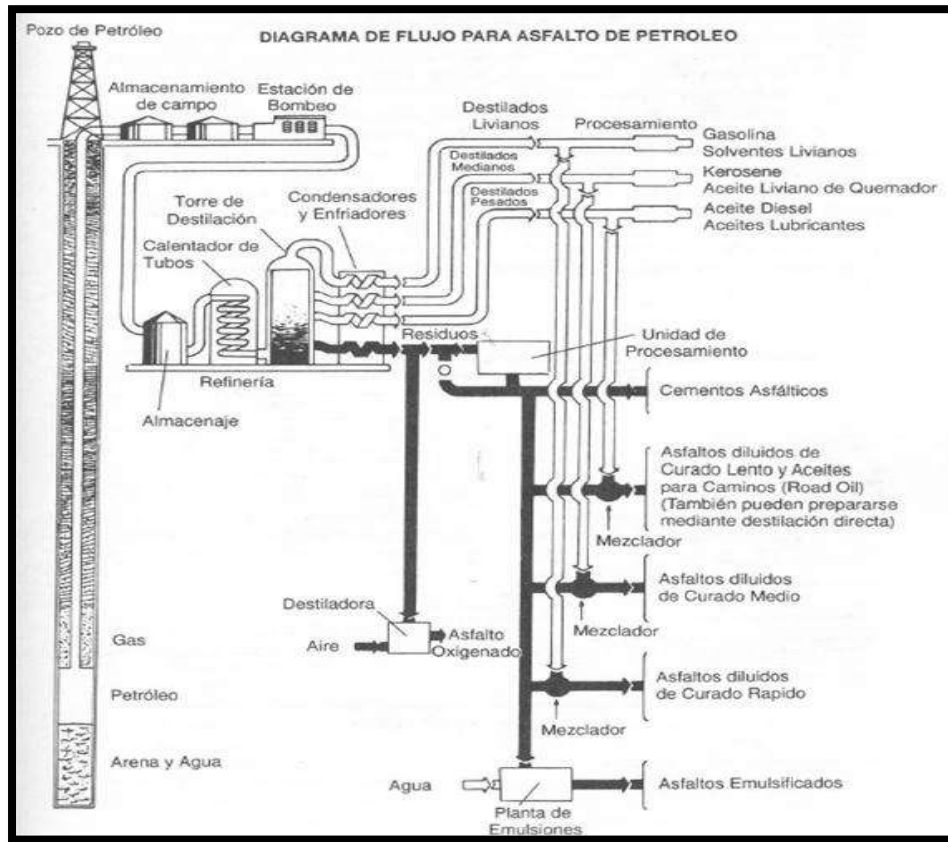


Fig. I.15 Diagrama de la fabricación de los productos asfálticos, (fuente: Padilla, 2004).

Aunque el asfalto puede considerarse como un desecho, también puede verse como un producto de gran calidad, sobre el que se fundamenta gran parte de la construcción de los pavimentos flexibles, denominados así en virtud de este dúctil, flexible y tenaz material que los constituye y caracteriza.

En ingeniería el asfalto es un material de particular interés porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia práctica que da flexibilidad controlable a las mezclas de agregados pétreos con las que se combinan usualmente. Además es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por aplicación de calor, por la adición de solventes de volatilidad variable o por emulsificación.



Actualmente en carreteras se emplea asfalto, que puede ser de origen natural (*rocas o lagos asfálticos*) o artificial (producto del petróleo). Comúnmente dentro del nombre genérico de asfaltos se incluyen materiales de distinta procedencia, como lo son: los asfaltos y los alquitranes. Ambos materiales tienen en común su aspecto y sus propiedades aglomerantes. Los dos son materiales termoplásticos, viscosos, su color es negro y están conformados por una mezcla compleja de hidrocarburos.

Cuando el asfalto ha sido procesado, se le pueden volver a incorporar algunas de las diferentes fracciones que había poseído y que fueron separadas del crudo mediante la destilación o la extracción con solventes, para así, producir grados intermedios de asfaltos. Debido a los diferentes procesos constructivos que se suelen emplear en campo, se vuelve indispensable trabajar con un asfalto que presente características diferentes del asfalto convencional, con lo cual se da origen a la siguiente clasificación:

a. Asfalto Diluido o Cortado (conocidos como rebajados)

El vehículo para su aplicación utilizado es a base de solventes. Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de subbases y bases hidráulicas. Por razones ecológicas, PEMEX, suspendió la fabricación de asfaltos rebajados en 1995.

b. Asfalto Emulsificado.

El vehículo para su aplicación utilizado es a base de agua. Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones.

c. Cemento Asfáltico.

El vehículo de aplicación es el calor. Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.



Las propiedades y características de cada uno de estos asfaltos (como su consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad), da lugar a una gran variedad de aplicaciones en la construcción, como por ejemplo: mezclas asfálticas, bases estabilizadas, riegos de sello, riegos de liga, riegos de impregnación, entre otros.

El asfalto más comúnmente empleado para la elaboración de la capa de rodadura, es el cemento asfáltico, que al ser un material viscoso y pegajoso, se adhiere fácilmente a las partículas del agregado ya que su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelente aglutinantes, pues al ser calentados se licuan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del materia pétreo. Además de ser un excelente material impermeabilizante que no es tan fácilmente afectado por los ácidos, los álcalis (*bases*), o las sales, lo cual implica que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daños químicos.

I.7.1 Propiedades y características físico-químicas.

El cemento asfáltico por sí mismo es un material de construcción atractivo y estimulante con el cual trabajar. Su más importante característica, muchas veces una ventaja, a veces una desventaja, es su susceptibilidad térmica. Esto se refiere a que sus propiedades mensurables dependen de la temperatura, por esta razón, casi todos los ensayos de caracterización de cementos asfálticos y mezclas asfálticas deben de especificar la temperatura, puesto que sin una temperatura de ensayo especificada, este no podrá ser claramente interpretado.

El comportamiento del cemento asfáltico depende también del tiempo de aplicación de la carga, para la misma carga y el mismo asfalto, diferentes tiempos de aplicación de la carga implicarán propiedades diferentes. Por ello, los ensayos sobre los cementos asfálticos deben también especificar la velocidad de carga.



Como el comportamiento del cemento asfáltico también depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga, estos factores pueden intercambiarse. Es decir, una baja velocidad de carga puede simularse con temperaturas elevadas y una alta velocidad de carga puede simularse con bajas temperaturas.

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción en carreteras. Actualmente la normativa de la SCT y muchas otras no describen o clasifican al cemento asfáltico a partir de su composición química. Esto puede parecer sorprendente puesto que a través de la composición química se logra identificar de manera muy precisa las propiedades de cualquier sustancia.

Sin embargo, existen varias razones por las cuales la química no ha llegado a ser parte de los sistemas de clasificación, ya que el asfalto básicamente está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrógeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno, y otros elementos. Cuando el asfalto es disuelto en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfaltenos y maltenos.

Los asfaltenos no se disuelven en el heptano, y una vez separados de los maltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito, estos son los encargados de darle al asfalto su color y dureza.

Los maltenos se disuelven en el heptano, y se trata de líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Generalmente las resinas son líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro. Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas en el asfalto, mientras que los aceites actúan como medio de transporte para los asfaltenos y las resinas.

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

De acuerdo con los *Antecedentes del diseño y análisis de las mezclas asfálticas del SUPERPAVE, 1994*, las acciones y los cambios que pueden desarrollarse incluyen: evaporación de los compuestos volátiles, oxidación (combinación de moléculas de hidrocarburos con moléculas de oxígeno), polimerización (combinación de dos o más moléculas para formar una sola molécula más pesada), y otros cambios químicos que pueden afectar considerablemente las propiedades del asfalto. Las resinas se convierten gradualmente en asfaltenos durante estas reacciones, y los aceites se convierten en resinas, ocasionando así un aumento en la viscosidad del asfalto.

Este aumento de viscosidad con el envejecimiento es ilustrado en la figura I.16, donde se indica el cambio en viscosidad después de una prueba normal de envejecimiento.

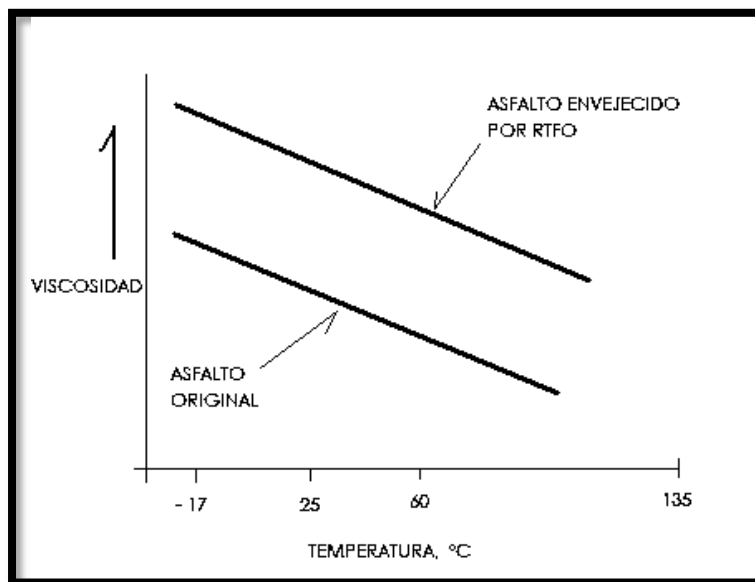


Fig. I.16 Endurecimiento del asfalto después de haber sido expuesto a altas temperaturas, (fuente: *Antecedentes del diseño y análisis de las mezclas asfálticas del SUPERPAVE, 1994*).

Debido a que una evaluación química es compleja y dificulta la estimación de su desempeño, se recurre más comúnmente a la evaluación de sus propiedades físicas o mecánicas, las cuales se analizan a través de ensayos que representan las condiciones más críticas a las que se verán sometidas.



Las propiedades físicas del asfalto de mayor importancia para el diseño, construcción y mantenimiento de las carreteras, son: la durabilidad, adhesión, susceptibilidad térmica, envejecimiento y endurecimiento.

▫ **Durabilidad**

Es la medida de la capacidad que tiene el asfalto para retener sus características originales cuando este es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.

Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, y por lo tanto difícil de definir solamente en términos de las propiedades del asfalto. Esto se debe a que el comportamiento del pavimento está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra y otras variables.

Sin embargo, existen pruebas que son usadas para evaluar la durabilidad del asfalto, estas son las Prueba de Película Delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO).

▫ **Adhesión y Cohesión**

Es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla asfáltica. La cohesión por su parte, es la capacidad del asfalto de mantener firmemente, en su posición, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión, más bien analiza una propiedad del asfalto considerada por algunos como una relación con la adhesión y la cohesión. Consecuentemente, el ensayo es del tipo “califica – no califica”, y solo puede indicar si la muestra es o no lo suficientemente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos.



▫ **Susceptibilidad Térmica**

Todos los asfaltos son termoplásticos, es decir, se vuelven más duros (mas viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Esta característica se conoce como susceptibilidad térmica y varía entre asfaltos de diferente origen, aun si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

Es un de las características mecánicas más importantes del asfalto, pues es de vital importancia que el asfalto sea susceptible a la temperatura, para que a altas temperaturas posea la suficiente fluidez y pueda cubrir las partículas del agregado pétreo durante el mezclado y a su vez, ser capaz de volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales, para mantener unidas las partículas de agregado.

▫ **Envejecimiento y Endurecimiento**

Los asfaltos tienden a endurecerse en la mezcla asfáltica durante la construcción, y a también una vez colocados en el pavimento terminado, dicho endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (asfalto en combinación con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las presentes durante la construcción) y en películas delgadas de asfalto (como las que cubren las partículas de agregado).

Estos procesos pueden ser retardados si se mantiene, en el pavimento terminado, una cantidad pequeña de vacíos de aire interconectado, junto con una capa gruesa de asfalto cubriendo a las partículas de agregado.

Al emplear el asfalto como un estabilizador en materiales granulares, da como resultado una alta estabilidad, por lo que es considerado igual que el cemento, la cal y otros conglomerantes hidráulicos.



La principal diferencia entre los aglomerantes asfálticos y los conglomerantes hidráulicos es que mientras éstos últimos dan lugar a materiales con una alta resistencia, de comportamiento elástico, frágiles e insensibles a la temperatura, los otros, se caracterizan por una menor resistencia y un comportamiento que depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga, pueden asumir deformaciones pequeñas por largos periodos de tiempo permitiendo adaptarse a los pequeños asientos y deformaciones que experimentan las capas inferiores del pavimento.

Esta es la razón por la cual a los pavimentos constituidos por capas granulares y mezclas asfálticas se les conoce como firmes flexibles, frente a los constituidos por capas de concreto, más elásticas e indeformables, que se denominan pavimentos rígidos.

I.7.2 Comportamiento mecánico y reológico del asfalto

Las características mecánicas y funcionales del cemento asfáltico son decisivas para el comportamiento que la mezcla asfáltica tendrá al momento de entrar en servicio, por estarazón se presta una mayor atención a la característica mecánica y resistente de los asfaltos, en especial a su deformación a baja carga (reología), su poder aglomerante y su comportamiento y resistencia a la rotura, (*Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, 1982*).

La reología estudia la respuesta mecánica de un material, cuyas propiedades varían en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de una carga, excluyéndose los fenómenos de rotura. Los asfaltos son materiales visco-elásticos que presentan un comportamiento reológico muy complejo. La respuesta de un asfalto frente a una sollicitación, depende de la temperatura, de la magnitud y el tiempo de aplicación de la carga. Para caracterizar a un asfalto a una temperatura y/o tiempo determinados, se deben caracterizar al menos dos propiedades, la resistencia del material a la deformación y su distribución entre sus componentes elástica y viscosa.

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

La forma experimental más extendida de caracterizar este comportamiento es a través de ensayos dinámicos de oscilación, en los que se mide un Módulo complejo G^* que representa la relación entre la tensión aplicada y la deformación experimentada por el material y un ángulo de fase δ , que es la diferencia de fase entre la tensión y la deformación, y que da una idea sobre la distribución de las dos componentes, elástica y viscosa del material (fig. I.17).

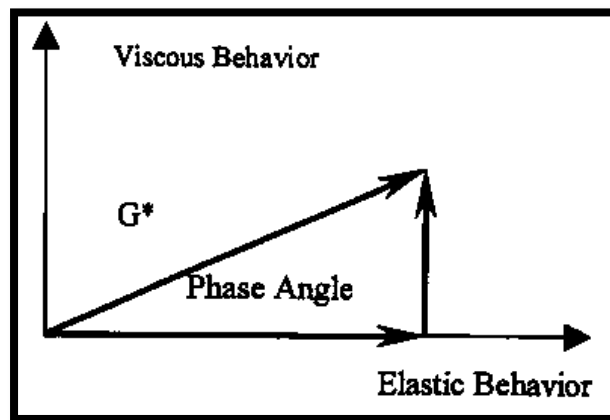


Fig. I.17 Rigidez del asfalto y ángulo de fase, (*Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, 1982*).

La componente elástica está en fase y tiene un valor de $\delta = 0$ grados, mientras que la viscosa tiene un ángulo de fase $\delta = 90$ grados.

Hay que destacar que la dependencia de estas variables en función del tiempo o de la temperatura puede relacionarse debido al principio de superposición frecuencia-temperatura. Podemos observar en la siguiente figura I.18 siguiente, los cambios en la rigidez del asfalto debido a los cambios en la temperatura.

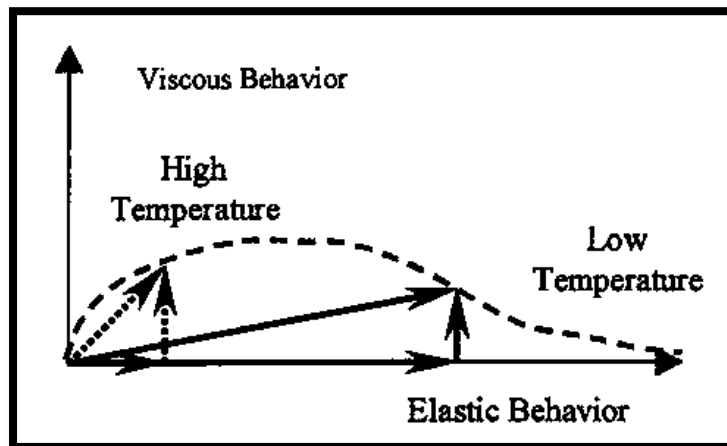


Fig. I.18 Cambio en la rigidez del asfalto debido a la temperatura, (*Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, 1982*).

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

La forma en que cambien será función de la composición del asfalto, algunos lo harán de forma muy rápida y otros de forma más lenta, lo que hace que distintos asfaltos puedan tener distintos G^* y δ .

A altas temperaturas el valor de δ se acerca a 90 grados para todos los asfaltos, lo que refleja el comportamiento completamente viscoso del material, pero los valores de G^* varían, lo que implica una diferencia en la consistencia de los asfaltos.

En la imagen I.19, se presentan los diferentes intervalos de temperatura relacionados con las propiedades reológicas de un asfalto incluyendo también el posible deterioro del pavimento que puede originarse.

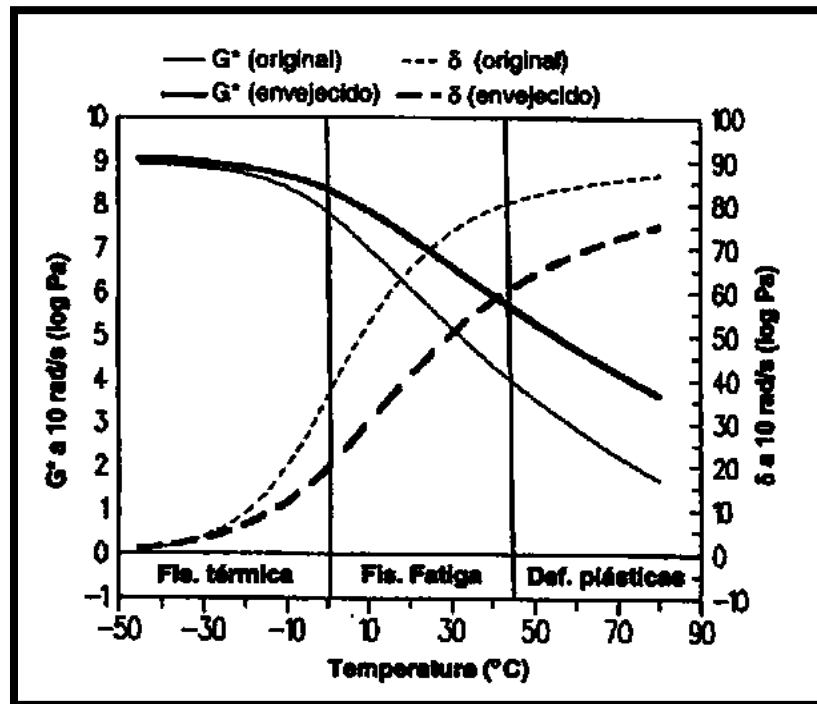


Fig. I.19 Propiedades del asfalto en función de la temperatura, (Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, 1982).

- A Temperaturas superiores a 100° C., todos los asfaltos se comportan como fluidos newtonianos, y por lo tanto su viscosidad es independiente del tiempo de aplicación de la carga, aunque son temperaturas que no se producen en carreteras en servicio, siendo suficiente las medidas de viscosidad para estudiar su trabajabilidad.
- A Temperaturas entre 45° y 85° C., los mayores fallos en las carreteras se deben a las deformaciones plásticas y se necesita medir tanto G^* como δ . Un valor alto de G^* será bueno pues representará una mayor resistencia a la deformación y un valor bajo de δ también porque significa un comportamiento más elástico del asfalto.
- A Temperaturas intermedias entre 0° y 45° C., los asfaltos son más duros y elásticos que a mayores temperaturas y el mayor problema es la fisuración por fatiga causada por la repetición de ciclos de cargas. Nuevamente son



importantes tanto G^* como δ , pues el daño producido por la carga estará en relación de cuanta deformación se produce y cuánta de esa deformación es recuperable.

- A Temperaturas por debajo de los 0° C., el mayor problema es la fisuración térmica debido a las tensiones que se producen en las capas de pavimento por la contracción térmica que ocurre al bajar las temperaturas. La magnitud de estas tensiones viene dada por la rigidez, la resistencia a la deformación del asfalto y por su habilidad para relajar estas tensiones disipando la energía producida en un flujo permanente, es decir se necesita un G^* pequeño y un δ alto. Debido a que interviene el problema de la fisuración por movimientos térmicos hay que considerar tiempos de sollicitación más largos.

Se ha indicado también que las propiedades del asfalto dependen del tiempo de aplicación de las cargas y por eso habrá que tenerlo en cuenta al estudiarlas en los distintos intervalos de temperatura descritos.

I.7.3 Aspectos involucrados en el envejecimiento del asfalto.

Dadas las características mencionadas anteriormente, siempre que exista un conocimiento elemental y sean utilizadas prácticas adecuadas en el diseño de la mezcla, en las operaciones de fabricación y puestas en obra de las mezclas asfálticas no existe probabilidad de provocar daños prematuros a la carpeta. Sin embargo es importante determinar que dentro de los factores que afectan el endurecimiento del asfalto el más importante es la calidad del mismo.

Investigaciones realizadas por científicos de Estados Unidos, sobre el endurecimiento del asfalto, tomando como base la incidencia de diferentes condiciones climáticas en las que se encuentran las carpetas asfálticas, concluyen que la alta temperatura del aire, es el factor



más importante que afecta la velocidad y magnitud del envejecimiento de las carpetas asfálticas en climas cálidos. Mientras que en estudios realizados en Australia, se dedujo que la velocidad de oxidación térmica del asfalto se incrementa aproximadamente al doble por cada 10°C de incremento en la temperatura, siendo el endurecimiento de la superficie asfáltica mayor, debido a los efectos de la temperatura y la luz ultravioleta.

Por otra parte se determinó que los intersticios y la porosidad del agregado pueden ser factores que propicien el fenómeno de endurecimiento del asfalto, sin embargo, estos factores son dependientes de la susceptibilidad del asfalto a este fenómeno. Es decir, que la permeabilidad del aire, por si misma no es un factor que incremente la velocidad del endurecimiento del asfalto; más aún, el contenido de huecos de los agregados, en combinación con un insuficiente espesor de la película de recubrimiento de asfalto, forma en conjunto la suficiente influencia para acelerar el proceso de envejecimiento del asfalto.

Para reiterar la relación que existe entre, las propiedades físicas y químicas de los asfaltos. Se presenta en la figura I.20 una muestra típica de la variación cuantitativa de los correspondientes asfaltos, producto del endurecimiento del asfalto durante 18 años.

La muestra corresponde a un tramo de prueba construido en E.U., el procedimiento usado es el ASTM-D-4124. La composición mostrada está basada en una determinación cuantitativa de cuatro fracciones genéricas encontradas en todo el asfalto usado. Donde se observó que hay un incremento del contenido de los asfáltenos y una significativa reducción de los nafteno-aromáticos.

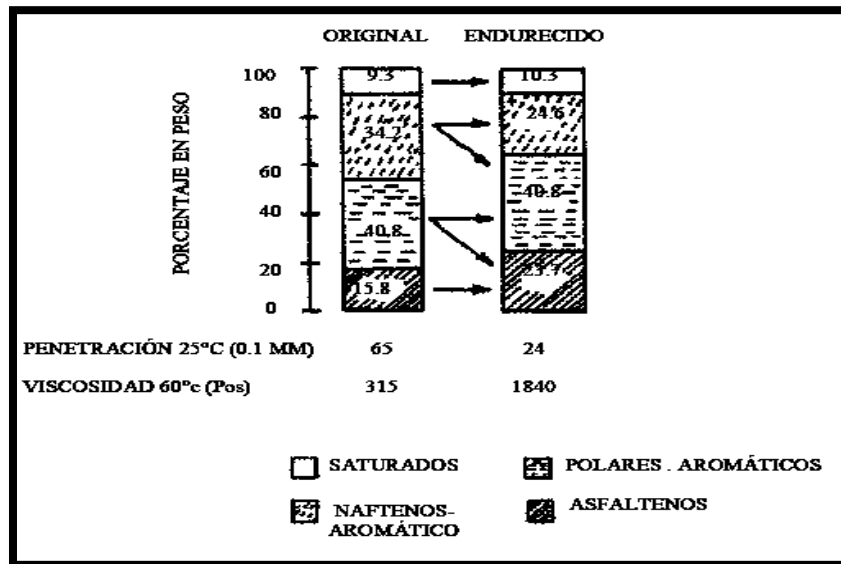


Fig. I. 20Variación de los componentes de un asfalto envejecido durante un periodo de 18 años,(Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente, 1982).

Es importante señalar que el asfalto está compuesto por moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del aire oxidándose lo que les hace más duros y frágiles. Se debe tener en cuenta que gran parte del envejecimiento o endurecimiento oxidativo tiene lugar antes de que el asfalto esté compactado, durante el proceso de mezcla en el que el asfalto está sometido a altas temperaturas y en forma de película fina, lo que hace que el proceso sea más rápido, pudiéndose producir en este periodo otros tipos de envejecimiento, como la pérdida de los componentes más volátiles del asfalto, que se traduce en un endurecimiento del mismo.

Por lo cual si se desea comparar las propiedades del asfalto con su comportamiento en la mezcla, se debe estudiar el asfalto en el estado de envejecimiento en que va a estar el material cuando esté en uso, y por lo tanto habrá que someterlo a un envejecimiento artificial acelerado antes de estudiar alguna de sus propiedades.



I.8 Mezclas asfálticas

Según Padilla(2004), la mezcla asfáltica es el producto de unir asfalto con material granular bajo unos criterios y normas establecidas. Esta mezcla actúa como esqueleto que aporta resistencia y rigidez a la estructura del pavimento, cuyos valores dependen de las propiedades individuales de los materiales, las condiciones ambientales y la carga que soportará la vía. Los porcentajes de las partículas del material granular (granulometría) que conforman las mezclas asfálticas hacen que se incrementen o disminuyan sus propiedades mecánicas y dinámicas.

Las mezclas asfálticas pueden tener comportamiento elástico lineal, no lineal o viscoso en función de la temperatura y tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas el comportamiento es fundamentalmente elástico y lineal al aumentar la temperatura se va comportado como un material elástico no lineal, con lo cual aparece un comportamiento viscoso a medida que la temperatura sigue aumentando. A temperaturas intermedias y elevadas, la cohesión de las mezclas disminuye y las deformaciones generadas por el tráfico se incrementan lo cual produce ahuellamiento en la mezcla debido a su componente viscoso.

En una mezcla asfáltica, las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como pavimento terminado.

Siendo muy importantes las propiedades individuales de los componentes de una mezcla asfáltica, es posible comprender y exponer el comportamiento de esta, considerando que el cemento asfáltico y el agregado mineral actúa como un sistema. Comprender de una mejor manera el comportamiento de las mezclas asfálticas, requiere considerar los tipos básicos de deterioros que se pretenden evitar, tales como: la deformación permanente, la fisuración por fatiga y fisuración por baja temperatura.



I.8.1 Principales características y comportamientos de las mezclas asfálticas.

De acuerdo con los antecedentes del diseño y análisis de las mezclas asfálticas del SUPERPAVE(1994), toda mezcla asfáltica preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. Este análisis está enfocado principalmente hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Estas características son:

▣ Densidad

La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de mezcla). Se trata de una característica muy importante, debido a que es esencial tener una alta densidad en la carpeta asfáltica para obtener una capa duradera. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua ($1,000 \text{ kg/m}^3$ o 62.416 lb/ft^3). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad de la carpeta asfáltica elaborada en obra es o no adecuada.

▣ Vacíos

Los vacíos de aire son espacios pequeños o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos de la mezcla final una vez compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico. Normativamente, el porcentaje permitido de vacíos para carpetas asfálticas densas esta entre 3 y 5 por ciento.

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos, la razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes a través de la



mezcla por los que puede entrar el agua y el aire, generando un incremento en el deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación del asfalto.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados, ya que entre más alta sea la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa.

▣ **Vacíos en el Agregado Mineral**

Los vacíos en el agregado mineral (VMA), son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla asfáltica compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto y el volumen de vacíos necesarios en la mezcla. Cuanto mayor sea el VAM, más espacio habrá disponible para la película de asfalto, condición idónea, ya que cuanto más gruesa es la película de asfalto que cubre las partículas de agregado pétreo, mas durable será la mezcla.

▣ **Contenido de Asfalto**

La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio y luego controlada con precisión en obra.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla, depende en gran medida del método de diseño de pavimento seleccionado y de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto, cuanto más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total y consecuentemente la cantidad de asfalto requerido para cubrir de forma uniforme todas las partículas pétreas.



I.8.2 Parámetros analizados en el diseño de mezclas asfálticas

Según el SUPERPAVE, el objetivo primordial de todo procedimiento de diseño de mezclas, es el de garantizar que la mezcla asfáltica posea por lo menos las propiedades que contribuyen a la buena calidad de las carpetas asfálticas, las que incluyen la estabilidad, la durabilidad, la impermeabilidad, la trabajabilidad, la flexibilidad, la resistencia a fatiga y la resistencia al deslizamiento.

▣ **Estabilidad**

Es la capacidad de mantener su forma y regularidad bajo cargas repetidas; un pavimento inestable desarrolla ahuellamientos, ondulaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla. La estabilidad de una mezcla asfáltica depende de la fricción y la cohesión interna. La fricción interna en las partículas de agregado está relacionada con las características del agregado pétreo, tales como la forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad del cemento asfáltico.

▣ **Durabilidad**

La durabilidad de un pavimento asfáltico es su capacidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), y separación de las películas de asfalto. Estos factores pueden ser el resultado de la acción del clima, el tránsito, o una combinación de ambos.

En general, la durabilidad puede ser mejorada de tres formas, estas son: usando una mayor cantidad posible de asfalto, ya que películas gruesas de asfalto no se endurecen o envejecen tan rápido como películas de asfalto delgadas; usando una graduación densa de agregado firme, duro y resistente a la separación; y finalmente a través de un diseño y compactación de la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad.



▣ Impermeabilidad

La impermeabilidad de una carpeta asfáltica es la resistencia al paso del aire y agua hacia su interior o a través de él. Esta característica está relacionada con el contenido de vacíos de la mezcla compactada, y el tamaño de los vacíos sin importar si están conectados o no.

Aunque la impermeabilidad es importante para la durabilidad de las carpetas asfálticas, realmente todas las carpetas asfálticas usadas en la construcción de carreteras tienen cierto grado de permeabilidad.

▣ Trabajabilidad

La trabajabilidad está descrita por la facilidad con que una mezcla de pavimentación puede ser colocada y compactada; así mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. La trabajabilidad puede ser mejorada modificando los parámetros del diseño de la mezcla, el tipo de agregado y/o la granulometría.

Un contenido alto de polvo mineral en la mezcla asfáltica puede afectar a la trabajabilidad de la mezcla, ya que la vuelve muy viscosa y dificulta su compactación.

Aunque el asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, si tienen algún efecto esta propiedad. Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta genera el efecto contrario.

▣ Flexibilidad

La flexibilidad es la capacidad de una carpeta asfáltica para acomodarse a movimientos y asentamientos graduales de las capas inferiores sin sufrir agrietamientos. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe de buscar un equilibrio entre estos.



▣ Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Las características de resistencia y espesor de una carpeta asfáltica y la capacidad de soporte de la subrasante, están directamente relacionadas con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito.

Se ha demostrado a través de investigaciones, que los vacíos y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos aumenta en una carpeta asfáltica debido a una mala compactación o un mal diseño, la resistencia a la fatiga disminuye. Así mismo, una carpeta que contiene un asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente, presenta menor resistencia a la fatiga.

▣ Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento se refiere a la capacidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. Para obtener una buena resistencia al deslizamiento, el neumático debe de ser capaz de mantener contacto con las partículas de agregado en vez de rodar sobre una película de agua en la superficie del pavimento (hidroplaneo).

CAPITULO II

CARACTERÍSTICAS DEL FILLER Y SU INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO Y DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

- II.1 Introducción
- II.2 Procedencia del polvo mineral ofiller
- II.3 Características y efectos del empleo de filler en las mezclas asfálticas
- II.4 Influencia del filler en el comportamiento y desempeño de una mezcla asfáltica
- II.5 Interacción filler – asfalto (*mástico*)



CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DEL FILLER Y SU INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO Y DURABILIDAD DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

II.1 Introducción

El diseño, implementación y construcción de estructuras de pavimentos flexibles es la alternativa de pavimentación más económica como técnica en las obras de infraestructura vial según Andrés Guillermo Flores (2004). Sin embargo, a pesar de esta consideración, estas obras han sufrido inconvenientes y fallas que han generado una disminución considerable en su efectividad y durabilidad, generando como consecuencia una incomodidad en los usuarios que utilizan estos corredores, ya que el mantenimiento en estas vías restringe su uso.



Por diversas causas es frecuente ver cómo nuestras carreteras se deterioran en períodos de tiempo inferiores a aquellos para las que fueron diseñadas. Las razones de este acortamiento de la vida útil pueden ser variados y de muy diferentes orígenes, y por lo tanto, tener consecuencias diferentes a la hora de juzgar si un pavimento está en buen o mal estado.

Los materiales tienen posibilidad de influir positiva o negativamente en la durabilidad de una carpeta asfáltica, debido a que no son muchos los que las conforman y por lo tanto, teóricamente deben de ser fácilmente controlables sus calidades.

En una estructura de pavimento, la calidad de las primeras capas es primordial para el buen funcionamiento de toda la estructura, ya que una mala calidad de estas da lugar a deterioros cuya reparación es muy costosa y difícil de ejecutar.

El filler es un elemento esencial dentro de las mezclas asfálticas, ya que es el componente que se mezcla más íntimamente con el asfalto, modificando su reología y comportamiento. Normalmente, la caracterización del filler se hace independientemente del tipo de asfalto a emplear, sin tener en cuenta las posibles interacciones que las propiedades de uno y de otro pueden tener en el comportamiento conjunto.

Comúnmente el polvo mineral o filler es considerado como parte del sistema de agregados. Sin embargo, al observar cualquier mezcla asfáltica se ha identificado que realmente está embebido en el asfalto, de tal forma que el mástico está fijando o aglomerando los agregados gruesos.

El término “*filler*” proviene del inglés y significa “*rellenador*”, debido a que inicialmente se le consideraba a este como un material de relleno de vacíos. Este concepto ha evolucionado y actualmente se le considera no solo como un inerte relleno sino como un material que al mezclarse con el asfalto desempeña cierta actividad que modifica algunas de las propiedades del sistema.



Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se define como polvo mineral o filler, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #200 y de acuerdo con la American Society of Testing and Materials (ASTM), standard D-242, cuando el 70 % o más de las partículas de polvo mineral pasan la malla N° 200 (75µm).

II.2 Procedencia del polvo mineral o filler

Por las características granulométricas que debe cumplir el agregado mineral para ser considerado como un filler, este puede proceder de diferentes fuentes, tales como procesos industrializados, escorias o de los agregados mismos para la elaboración de las mezclas asfálticas.

Con base en lo anterior, y de acuerdo con Alejandro Padilla(2004), es posible clasificar de manera general en dos grupos, los cuales se describen a continuación:

✦ **Filler de aportación**

Se trata de un producto comercial de naturaleza pulverulenta (*cemento, cal, cenizas volantes de central térmica, etc.*) o un polvo en general calizo, especialmente preparado para utilizarlo en el mástico de las mezclas asfálticas.

Usualmente y cuando se trata de un producto de tipo comercial (cemento, cal, polvo calizo, etc.), el proveedor garantiza perfectamente su calidad y proporciona sus características físicas y químicas, así como las proporciones en la mezcla asfáltica para garantizar un adecuado desempeño en la mezcla.



☒ **Filler de recuperación**

Es el polvo mineral que está presente en los agregados pétreos y que se le puede separar del resto mediante cribado. A diferencia del filler de aportación, de este material se desconocen sus características y el efecto que proporciona a la mezcla, ya que fácilmente sus características físicas y químicas cambian en la medida que se utilice un banco de material diferente.

II.3 Características y efectos del empleo de filler en las mezclas asfálticas

De acuerdo con Oscar Javier Reyes et al(2006), las características que más suelen interesar de un polvo mineral o filler por el efecto favorable que produce en una mezcla son las siguientes:

☒ **Finura**

Al ocupar parcialmente los espacios libres dejados por la estructura granular compactada y conformada por las partículas mayores, el polvo mineral reduce el volumen de vacíos de la mezcla evitando un aumento pronunciado de la cantidad de cemento 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.

☒ **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 asfalto, 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 asfalto, se mejora la resistencia a la acción de desplazamiento que ejerce el agua sobre el asfalto.

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 cemento asfáltico en la mezcla.

II.4 Influencia del filler en el comportamiento y desempeño de una mezcla asfáltica

La calidad de las mezclas asfálticas para pavimentación se puede resumir en tres propiedades principales según Oscar Javier Reyes et al (2006), las cuales son: Resistencia ante la deformación, flexibilidad y durabilidad, en las cuales el filler tiene una influencia importante, ya que su inclusión permite las siguientes características

☒ **Mejorar el cerrado de la mezcla sin el empleo exagerado de asfalto.**

Debido a que el filler actúa como relleno de vacíos, lo cual permite disminuir espacios libres entre agregados mayores.



☒ **Incrementar la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica.**

Debido a que el filler aumenta la viscosidad del asfalto, o mejor dicho el mástico es un sistema de alta viscosidad el cual participa de manera importante en la resistencia a la deformación.

☒ **Incrementar la durabilidad de la mezcla.**

Esto debido a que el filler actúa como relleno de vacíos, lo cual permite disminuir la porosidad dificultando la entrada de agentes agresivos como agua y aire.

La capacidad de absorción del agregado usado en la mezcla asfáltica es fundamental para determinar el contenido de asfalto óptimo. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se pueda cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay polvo mineral. Los pequeños incrementos en la cantidad del polvo mineral pueden absorber literalmente gran parte del contenido del asfalto, resultando en una mezcla asfáltica inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda).

Cualquier variación en el contenido de relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla tiene poco o demasiado polvo mineral, cualquier ajuste arbitrario para corregir la situación probablemente la empeorara.

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, texturasuperficial y la porosidad accesible de las partículas.

Para la caracterización físico-química del filler y su influencia en el comportamiento ydurabilidad de las mezclas asfálticas, el factor más significativo es la intensidad deadsorción.

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 característicasestructurales, 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 ymoléculas 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 muchos tipos de filler activos como la cal hidratada y los dolomíticos que suelen mantener su resistenciaen periodos de tiempo largos de tiempo en condiciones de contenido óptimo de asfalto, mientras que los filler no activos como basaltos y areniscas suelen deteriorarserápidamente, también bajo condiciones de contenido óptimo de asfalto.

El contenido de asfalto tiene sus repercusiones en la durabilidad de una mezcla, se sabe queun incremento en el contenido de asfalto tiene un efecto favorable significativo en ladurabilidad de los pavimentos, este efecto se debe principalmente, a que las capas de asfaltoque recubren los agregados son más gruesas y a la reducción en el volumen de huecos, quehace 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 del filler 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 filler no activos resultan ser más sensibles al contenido de asfalto que en aquellas que contienen filler activos.

II.5 Interacción filler – asfalto (*mástico*)

Muchos Investigadores han tratado de explicar el mecanismo de interacción Filler-Asfalto mediante diferentes teorías, de acuerdo con Israel Sandoval et al (2011), uno de los principales y mejor aceptados es el modelo propuesto por Tunnicliff, teoría que A. Faheem y H. Bahia, conceptualizaron en 2009.

Tunnicliff, en un esfuerzo por explicar teóricamente la interacción entre las partículas de filler y el asfalto, propuso que las partículas de filler influyen la matriz de asfalto mediante dos mecanismos.

- ⌘ En el primero la partícula adsorbe una película asfalto, requerida para cubrir la partícula. El volumen de asfalto adsorbido por este mecanismo puede considerarse como “*Volumen de asfalto influenciado*”. Esto significa que este volumen de asfalto es consumido en cubrir la partícula y que no contribuye a lubricar el flujo de la mezcla.

- El segundo mecanismo explica que el filler influye sobre un volumen adicional de asfalto que no es adsorbido. La influencia del filler se refleja en un aumento de la resistencia de la segunda capa no-adsorbida a través de un gradiente con el aumento de resistencia máximo cercano a la capa adsorbida, y la resistencia decrece gradualmente a través del espesor de esta capa hasta casi desaparecer.

Las fracciones “a”, “b” y “c”, que se muestran en la figura II.1, son consideradas como una unidad incluida en la matriz de asfalto, como una partícula de resistencia efectiva. Estas unidades flotan en un exceso de asfalto causando este aumento en la resistencia. Este exceso de asfalto es llamado “Asfalto libre”.

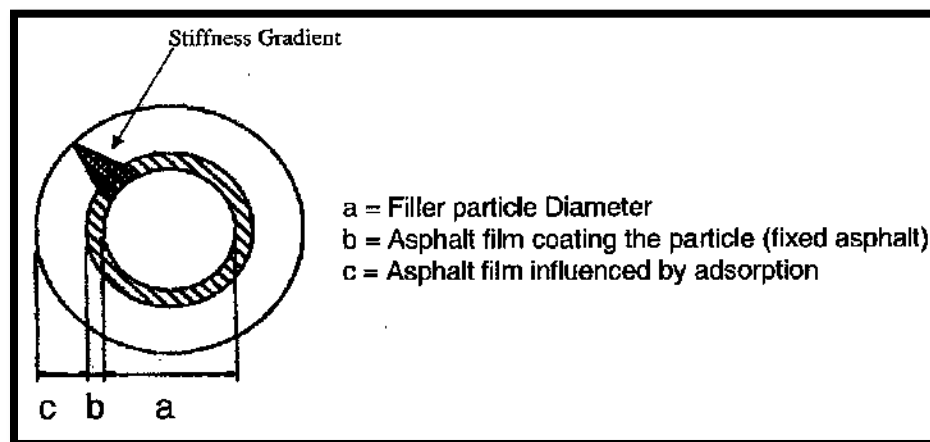


Fig. II.1 Esquema de interacción filler– asfalto, (fuente: Israel Sandoval et al, 2011).

En otras palabras, la teoría de Tunnicliff es que debido a la interacción asfalto-filler existe un volumen efectivo de partículas de filler el cual es más grande que el volumen de solo filler. Aunque la propuesta de Tunnicliff es ampliamente aceptada, el volumen de asfalto influenciado por el filler no ha sido medido con éxito en laboratorio porque es difícil de medir.

CAPÍTULO III

ESTUDIOS EXPERIMENTALES.

- III.1 Introducción
- III.2 Plan de trabajo
- III.3 Tipos de filler o polvos minerales analizados
- III.4 Estudios de caracterización tradicional aplicados al filler
 - III.4.1 Plasticidad
 - III.4.1.a Determinación del Limite Liquido (ωL)
 - III.4.1.b Determinación del Limite Plástico (ωP)
 - III.4.1.c Determinación del Índice Plástico (IP)
 - III.4.1.d Determinación del Límite de contracción (LC)
 - III.4.1.e Determinación de la Contracción Lineal (CL)
 - III.4.2 Equivalente de arena
 - III.4.3 Determinación del pH
 - III.4.4 Azul de metileno
- III.5 Estudios de caracterización no tradicional aplicados al filler
 - III.5.1 Análisis granulométrico de partícula fina
 - III.5.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB)
 - III.5.3 Difracción de rayos X (DRX)
- III.6 Estudio de la influencia del tipo de filler ante el efecto térmico, la humedad y el envejecimiento del mástico mediante el método UCL®.
 - III.6.1 Evaluación de la susceptibilidad térmica.
 - III.6.2 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad.
 - III.6.3 Evaluación de la susceptibilidad al envejecimiento.
- III.7 Estudio del efecto del tipo de filler en las propiedades reológicas del mástico mediante el reómetro de corte dinámico (DSR).



CAPÍTULO III

ESTUDIOS EXPERIMENTALES

III.1 Introducción

En capítulos precedentes se ha resaltado la importancia que el agregado pétreo tiene en el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica, así como el desempeño que la experiencia e investigaciones recientes han aportado respecto al tema de la influencia del filler en la misma, sin embargo fue posible identificar con base en la revisión bibliográfica que México no tiene desarrollo en el control de la calidad de esta fracción pétreo, siendo posible emplear casi cualquier tipo de agregado.



Tomando en cuenta las premisas anteriores, se decidió desarrollar la presente tesis de investigación para corroborar la influencia y el efecto del filler en el asfalto e iniciar una nueva línea de investigación en el apartado de los agregados pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa. Los ensayos requeridos como parte de la investigación, fueron desarrollados en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil, el Laboratorio de Metalurgia Física del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, ambos pertenecientes a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), en Morelia, Mich., así como el Laboratorio de Asfaltos de la empresa LASFALTOSA de CV, en Guadalajara, Jal.

En el presente Capítulo se describen los ensayos realizados que fueron propuestos para alcanzar los objetivos planteados como parte de esta investigación. Las pruebas desarrolladas pretenden una caracterización y evaluación de los diferentes tipos de filler empleados a través de pruebas que involucran procedimientos de ensayo y parámetros descritos en la normativa vigente de la SCT, así como algunas que para efectos de esta investigación se han catalogado como no convencionales por no ser aplicadas en la caracterización o evaluación de esta fracción fina, pero que proporcionan una importante información acerca de las características que pueden influir en el comportamiento de las mezclas asfálticas, estos ensayos en particular, se desarrollaron en el Laboratorio de Metalurgia Física del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH, en Morelia Mich.; una caracterización y evaluación del filler mezclado con el asfalto (mástico), es indispensable como parte de la evaluación del efecto causado por el filler al asfalto y en consecuencia, a la mezcla asfáltica, para ello se desarrolló el análisis mediante la metodología descrita por el ensayo UCL[®], y un análisis reológico mediante el reómetro de corte dinámico para complementar este análisis.

Con los resultados obtenidos del conjunto de pruebas descritas, se pretende corroborar si el tipo de filler influye directamente en el comportamiento de una mezcla asfáltica, intentar identificar las características del agregado fino que pudieran influir directamente en el comportamiento obtenido, así como corroborar si los requisitos de calidad solicitados por la SCT son suficientes para controlar esta fracción pétreo.



III.2 Plan de trabajo

Como hasta este momento se analizó de manera breve dentro de la semblanza realizada, son muchos los parámetros presentes en el filler, los cuales pueden estar involucrados en el desempeño que una mezcla asfáltica puede presentar ante diferentes condiciones de trabajo. Con tal objetivo y con la finalidad de lograr abarcar la mayoría de todos ellos, el desarrollo de esta investigación se dividió en tres etapas de análisis, para que de esta manera se logre definir los criterios de diseño y de control de calidad que éste material debería de poseer afín de garantizar un buen comportamiento en las carpetas asfálticas.

Las etapas de estudio fueron clasificadas en función del uso acostumbrado del ensayo para la caracterización de la fracción fina o filler en México, y de los parámetros a evaluar obtenidos como resultado de estas. Estas etapas quedaron de la manera siguiente:

a. **Primera etapa de Estudio.** *Estudios de caracterización tradicional aplicados al filler.*

En esta etapa primera etapa se desarrollaron las pruebas correspondientes a una caracterización física de la fracción pulverulenta, que comprende la requerida por la normativa SCT para el control de la calidad de la misma. Como parte de los objetivos planteados en esta etapa, se determinaron los límites de consistencia de cada material empleado para determinar su naturaleza con base en la clasificación SUCS; como parte de los ensayos solicitados por la SCT, se trabajó con una granulometría conformada en la que solo se variaba el tipo de filler a fin de determinar el valor de equivalente de arena por cada mineral; con objeto de corroborar si la acides del mineral influye en la adhesividad con el asfalto, se evaluó el potencial de hidrógeno de estos minerales mediante el desarrollo de una solución concentrada con cada polvo mineral; y finalmente y a pesar de no ser solicitada por la SCT, pero de presentar en su manuales con el procedimiento, se realizó el ensayo de azul de metileno en cada muestra de filler.



b. **Segunda Etapa de Estudio.** *Estudios de Caracterización No Tradicional Aplicados al filler.*

Al contar con los parámetros físicos y la clasificación de los agregados minerales empleados en este proyecto de investigación, se decidió desarrollar una serie de pruebas que nos proporcionara características de la fracción mineral que no es posible obtener mediante los ensayos convencionales de caracterización. Por tal motivo, se propuso un análisis granulométrico de cada muestra de polvo mineral, a fin de conocer la distribución granulométrica de cada muestra de material que pasa la malla No. 200; para complementar el análisis granulométrico, se propuso desarrollar un ensayo que permitiera identificar las características morfológicas de cada una de estas muestras minerales, mediante fotografías a diferentes aumentos; finalmente y producto de lo que en la literatura se ha encontrado sobre la influencia mineralógica en el desempeño de las mezclas, se decidió realizar un análisis mineralógico de las muestras para identificar los minerales que cada muestra posee y como se puede correlacionar con el efecto producido en el asfalto.

c. **Tercera Etapa de Estudio.** *Estudio de la Influencia del Filler ante la Susceptibilidad Térmica, Adhesividad y Envejecimiento del Mástico Mediante el Método UCL[®].*

Basado en la evaluación de la cohesión proporcionada por el asfalto a una mezcla patrón y su variación con la temperatura, la presencia de agua y el envejecimiento del asfalto, se decidió aplicar la metodología para estudiar la influencia en el asfalto por la incorporación de cada polvo mineral o filler empleado en esta investigación, con lo que se evaluó el sistema combinado y no de manera aislada.

d. **Cuarta Etapa de Estudio.** *Estudio del Efecto del Tipo de Filler en las Propiedades Reológicas del Mástico Mediante el Reómetro de Corte Dinámico.*

Esta es la última etapa de ensayo comprendida para la tesis, en la que se realizó un análisis reológico de la mezcla filler asfalto o mástico, esto porque de acuerdo con la literatura, un



estudio reológico puede proporcionar información relevante sobre el comportamiento del mástico, que resulta útil para caracterizar y prever el comportamiento de las mezclas asfálticas ante ciertas fallas comunes en los pavimentos asfálticos, como deformaciones permanentes o roderas, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico, debido a que el mástico trabaja en conjunto dentro de la carpeta asfáltica cuando esta recibe una carga, y el aporte del filler al comportamiento reológico del asfalto puede ser muy importante en los parámetros reológicos del mismo, como son la viscosidad, la recuperación elástica, el módulo reológico, el ángulo fase, entre otros.

Finalmente se realizó un análisis particular de los resultados obtenidos por cada ensayo, a fin de proponer recomendación y justificar el desempeño observado hasta ese momento, así como estudios adicionales o posibles líneas de investigación que surgen a raíz de esta investigación y que servirían para complementar los resultados obtenidos.



III.3 Tipos de filler o polvos minerales analizados

Definir el número y tipos de filler o polvos minerales a emplear para el desarrollo de esta investigación fue la etapa crucial, pues se consideraba indispensable contar con una amplia gama de estos para un adecuado análisis pero lo suficientemente pequeña para concluir en tiempo y forma. Finalmente se llegó a la conclusión de ensayar doce tipos de filler, considerando que con esta cantidad de muestras se realizaría una correcta evaluación de la influencia que los diferentes polvos producen en la mezcla asfáltica.

Los materiales fueron seleccionados de tal manera que se lograra contar con una amplia gama de éstos, y que se pudiera abarcar la mayoría de los diferentes tipos y calidades de filler que comúnmente suelen estar presentes durante la elaboración de las mezclas asfálticas en las regiones de Morelia, Mich., y Guadalajara, Jal. Por tal motivo, se eligieron materiales partiendo desde los que presentan una excelente calidad y control en el proceso de su elaboración (materiales de aportación, pero algunos de elevado costo), pasando por los materiales naturales comúnmente empleados en dichas regiones (de recuperación), hasta el que es indeseable por su desempeño y característica, la arcilla.

Los materiales de aportación que serán empleados por este proyecto, y los cuales generalmente presentan una buena calidad y un perfecto control en su proceso de elaboración, son los siguientes:

1. Cemento portland.
2. Cal hidratada (de tres diferentes calidades):
 - a. Quimex 90 (hidróxido de calcio).
 - b. Quimex 95 (hidróxido de calcio).
 - c. Cal común de tipo comercial, y
5. Agregado de polvo calizo.



Como se mencionó en párrafos anteriores, se trabajarán seis tipos de filler de recuperación procedentes de los bancos de materiales más comúnmente empleados para la elaboración de mezclas asfálticas en las dos distintas regiones anteriormente mencionadas, los cuales son:

6. Banco de materiales Cerritos y Joyitas (*de la región de Morelia, Mich.*).
7. Banco de materiales AGC (*de la región de Morelia, Mich.*).
8. Banco de materiales Los Federales (*de la región de Guadalajara, Jal.*).
9. Banco de materiales La Vega (*de la región de Guadalajara, Jal.*).
10. Banco de materiales San Martín (*de la región de Guadalajara, Jal.*).
11. Banco de materiales Chapala (*de la región de Guadalajara, Jal.*).

Para completar la gama de materiales estudiados, se utilizó una muestra de arcilla obtenida de las canchas de CU, del campus ubicado en la ciudad de Morelia, Mich., logrando de esta manera completar dicha gama de materiales con menos deseable en la construcción:

12. Arcilla de las canchas de CU

Debido a la existencia de polvos minerales o filler de recuperación, fue necesario realizar un proceso de cribado para separar esta fracción pulverulenta del resto de las partículas pétreas de mayor tamaño. Se trató de una actividad ardua pero indispensable para el desarrollo de los estudios planteados y la conclusión de los objetivos.



III.4 Estudios de caracterización tradicional aplicados al filler

Los objetivos planteados para esta etapa de estudio comprenden identificar las propiedades y características físicas de los filler empleados, así como la obtención de los parámetros utilizados comúnmente para el control de calidad por la SCT. Para cumplir con este objetivo, se evaluarán los límites de consistencia, el valor de equivalente de arena, el potencial de hidrógeno (pH) y el valor de azul de metileno mediante las condiciones y procedimientos que a continuación se describen.

III.4.1 Plasticidad.

Se ha probado que la plasticidad de un material, es debido a su contenido de partículas más finas con forma laminar, con lo cual el material adquiere la propiedad de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

Con los experimentos realizados por Atterberg, Terzaghy y Golschmidt, se demostró que la plasticidad se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares, la cual genera campos que actúan como condensadores, influyendo directamente en las partículas bipolares del agua y según sea el espesor de esa capa de agua sólida y viscosa, el efecto en la interacción de las partículas de suelo determinará su plasticidad.

Lo anterior implica, que otros líquidos bipolares mezclados con polvo de arcilla deberían de producir suelos plásticos, mientras que, los líquidos mono polares generarían suelos exentos de tal propiedad, aunque si bien, las partículas equidimensionales de pequeña relación área a volumen presentan una escasa actividad eléctrica superficial, lo cual implica que nunca constituirán un suelo plástico, independientemente de su tamaño y otros factores.



Para el desarrollo de esta prueba, se siguieron las recomendaciones y procedimientos indicados por el manual “*M.MMP.1.07/07 Límites de Consistencia*”, de la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT); así como los procedimientos indicados en el “*Manual del Laboratorio de Mecánica de Suelos*” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) para la determinación del Límite de Contracción y la Contracción Lineal.

Para la SCT, estas pruebas permiten conocer las características de plasticidad de la porción de los materiales empleados en terracerías que pasan la malla No 40 (0.425 mm), cuyos resultados se utilizan principalmente para la identificación y clasificación de los suelos. Las pruebas solicitadas por el manual consisten en determinar solo el Límite Líquido (*contenido de agua para el cual un suelo plástico adquiere una resistencia al corte de 25 g/cm²*) y el Límite Plástico (*contenido de agua para el cual un rollito se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3 mm en una longitud de 10 cm*), así como el cálculo del índice plástico correspondiente a la muestra de suelo ensayada.

El procedimiento para obtener los valores correspondientes a los Límites Líquido y Plástico, así como el cálculo del índice plástico, fue considerando los procedimientos y recomendaciones señalados en el manual de la SCT anteriormente mencionado. El manual de pruebas de la UMNSH, fue empleado únicamente para seguir el procedimiento correspondiente al ensayo para el cálculo del Límite de Contracción y Contracción Lineal.

Es evidente que los requisitos granulométricos solicitados por el manual de la SCT para los materiales con que se trabaja, no cumplen con las solicitudes requeridas, sin embargo el ensayo se desarrolló siguiendo el procedimiento descrito.

El cálculo del Límite de Contracción (LC) y la Contracción Lineal (CL), son valores que no están solicitados por el manual de la SCT empleado para este ensayo, sin embargo se determinaron empleando el manual utilizado por el laboratorio de mecánica de suelos de la UMSNH para una caracterización más completa.

Para el desarrollo de esta prueba, inicialmente se separaron 250 g del filler que sería ensayado y se encontraba en estado seco, este material fue colocado en un recipiente de porcelana,(fig. III.1).



Fig. III.1 Muestra de filler para previo al ensayo.

A este material contenido dentro del recipiente, se le agregó agua hasta saturarlo completamente, (fig. III.2)



Fig. III.2 Muestra de filler saturada uniformemente.

Con ayuda de una espátula de cuchillo, se mezcló perfectamente el material hasta obtener una pasta suave y espesa, después de esto, la muestra se dejó en reposo durante 24 horas en un lugar fresco.

III.4.1.a Determinación del Límite Líquido (ω_L).

Después de dejar saturar al material durante 24 horas y mediante una espátula, se homogenizó el material y se tomó una porción de aproximadamente 150 g, los cuales fueron colocados en una cápsula de porcelana donde fueron homogenizados nuevamente hasta obtener una consistencia uniforme (fig. III.3).



Fig. III.3 Muestra de filler homogenizada previo al ensayo.

Después de tener homogenizado el material, se colocó en la parte central de la copa de casa grande de manera que esta quedara uniforme, iniciando desde el centro hacia los extremos y cuidando de no aplicar una presión excesiva para dejar la superficie nivelada con un espesor aproximado de 8 a 10 cm en la parte central de la copa (fig III.4).



Fig. III.4 Colocación del material en la copa de casa grande.

Mediante una pasada firme del ranurador se realizó la abertura en la parte central del material contenido en la copa, manteniendo siempre a éste de forma perpendicular a la superficie interior de la copa, (fig. III.5).

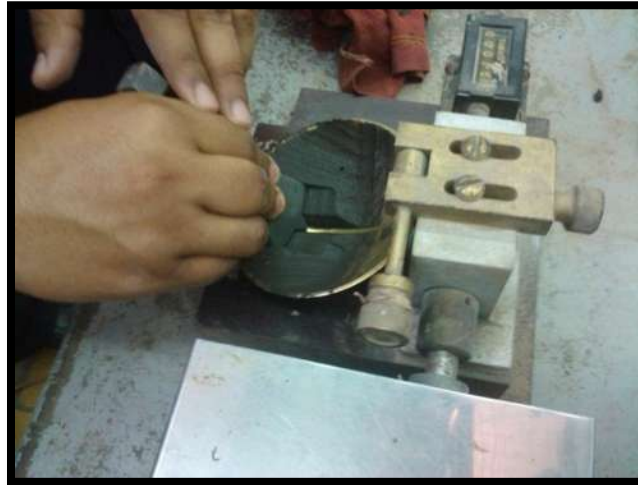


Fig. III.5 Abertura en la parte central del material mediante el ranurador.

Inmediatamente después de haber elaborado la ranura, se reinició el contador del equipo y se encendió el motor eléctrico que deja caer la copa a razón de dos golpes por segundo. Cuando los bordes inferiores se pusieron en contacto en una longitud de 13 mm, se detuvo el equipo y se registró el número de golpes que fueron ejecutados para lograr tal objetivo, (fig. III.6).

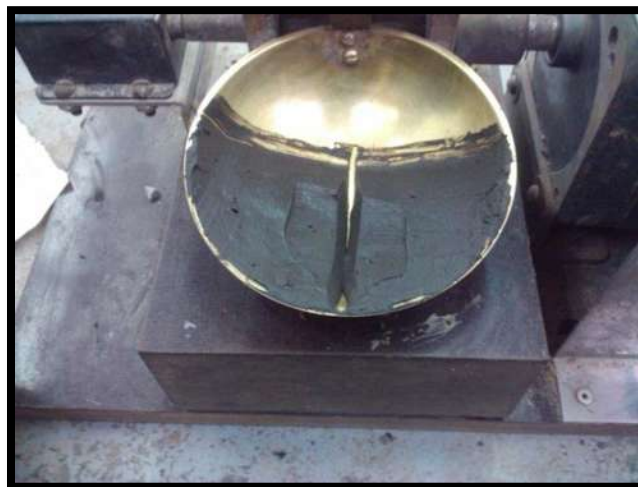


Fig. III.6 Unión entre bordes inferiores durante el ensayo.

Una vez logrado lo anterior, se tomaron aproximadamente 10 g de material de la porción cerrada de la ranura y fueron colocados en una cápsula metálica previamente identificada, lo anterior con la finalidad de determinar el contenido de humedad correspondiente al número de golpes necesarios para cerrarla, (fig. III.7).



Fig. III.7 Muestra para el cálculo de contenido de humedad del ensayo de límite líquido.

Después del paso anterior, el material restante se reintegró a la capsula de mezclado, para de así lograr lavar y secar la copa de Casagrande. Inmediatamente y con ayuda de un cuentagotas, se agregó agua al material y se homogenizó con ayuda de la espátula; dicho material es ensayado una vez más, desde la etapa de colocación de la muestra dentro de la copa de Casagrande hasta el paso anterior. Este procedimiento se repitió hasta completar cuatro determinaciones.

III.4.1.b Determinación del Límite Plástico (ω_P).

De la fracción de material preparado (*saturado durante 24 horas*), se tomó una porción de material suficiente como para formar una esfera de aproximadamente 12 mm de diámetro, la cual fue moldeada con los dedos para que pierda agua y manipulada sobre la palma de la mano para formar un cilindro.

Posteriormente, el cilindro se hizo rodar girar sobre la placa de vidrio mediante los dedos hasta reducir aproximadamente su diámetro a 3 mm en toda su longitud. La velocidad de girado, siempre estuvo comprendida entre 60 y 80 ciclos por segundo durante los ensayos.

Durante los ensayos, generalmente se alcanzaba un diámetro de 3 mm uniforme en toda la longitud (fig. III.8), pero la muestra no se rompía en tres secciones de manera simultánea, lo que significaba que el contenido de agua era superior al del Límite Plástico.



Fig. III.8 Comparación del diámetro del rollo de material obtenido con el alambre de diámetro patrón.

Cuando se presentaban casos como el anterior, el material era juntado y se formaba nuevamente la pequeña esfera, la cual era manipulada con los dedos para facilitar la pérdida de agua y lograr una distribución uniforme de la misma. Y nuevamente el cilindro se hacía rodar hasta reducirlo a 3 mm de diámetro y q se rompiera de manera simultánea. Si esto no ocurría el proceso se repetía nuevamente.

Cuando el cilindro alcanzaba el diámetro aproximado de 3 mm y se rompía en tres secciones en ese instante de manera simultánea, los fragmentos de este cilindro se colocaban en una cápsula metálica debidamente identificada, (fig. III.9). Lo anterior se realizaba con el objetivo de determinar el contenido de agua de dicho material.

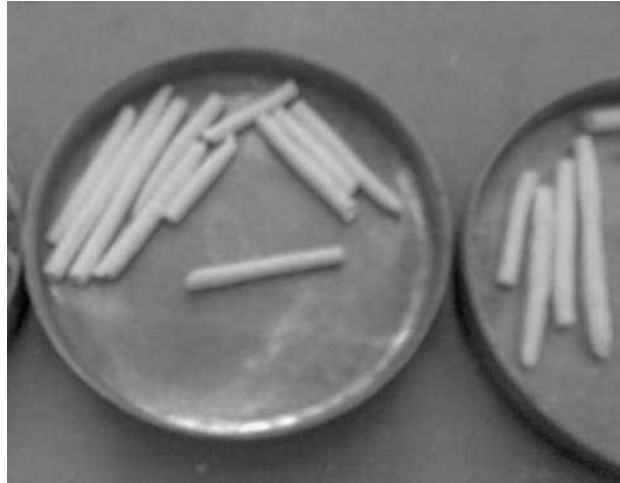


Fig. III.9 Muestra para el cálculo de contenido de humedad para el límite plástico.

Para mayor confiabilidad en los resultados, se tomó la recomendación que el manual de la SCT propone, y la prueba fue efectuada por triplicado, obteniendo para cada una de las determinaciones su respectivo contenido de agua.

III.4.1.c Determinación del Índice Plástico (*IP*).

Después de que fueron calculados los Límites Líquido y Plástico, se determinó el Índice Plástico mediante la expresión siguiente:

$$IP = \omega_L - \omega_P$$

Siendo:

IP = Índice Plástico del material, (%), con aproximación a la unidad.

ω_L = Límite Líquido del material obtenido como se señaló anteriormente, (%).

ω_P = Límite Plástico del material obtenido como se señaló anteriormente, (%).

Es importante comentar que durante estos ensayos, se presentaron casos en los que el material era muy arenoso o simplemente por sus características no fue posible determinar su límite líquido y el límite plástico, por lo que de acuerdo con el manual de la SCT para estas situaciones, los materiales fueron reportados como no plásticos (*NP*).

III.4.1.d Determinación del Límite de Contracción (*LC*).

El tamaño de la muestra para este ensayo fue de aproximadamente 100 g y fue tomada de la muestra que se estaba empleando cuando se alcanzó la consistencia aproximada del límite plástico.

Para este ensayo, primeramente se identificaron las capsulas que serían empleadas y se registraron sus pesos y volúmenes correspondientes. Se les aplicó una ligera capa de aceite en el interior para impedir la adhesión de la muestra a las paredes de la capsula, (fig. III.10).



Fig. III.10 Capa de aceite para impedir adherencia entre la muestra y las paredes de la capsula.

Posterior a lo anterior, esta cápsula fue llenada con la muestra que había sido separada previamente para este ensayo, fue presionada firmemente con una espátula con la finalidad de remover posibles burbujas de aire y posteriormente se enrasó para dejarla con el acabado final, (fig. III.11).



Fig. III.11 Llenado de capsula para ensayo de límite de contracción.

Inmediatamente después, las cápsulas que contenían el material fueron pesadas y se registró el peso de las mismas como peso de cápsula más suelo húmedo. Una vez realizado lo anterior, se colocaron en un lugar seguro y se dejaron secar a temperatura ambiente hasta el momento en que se observó un cambio en color de la muestra y un ligero cambio de volumen, (fig. III.12).

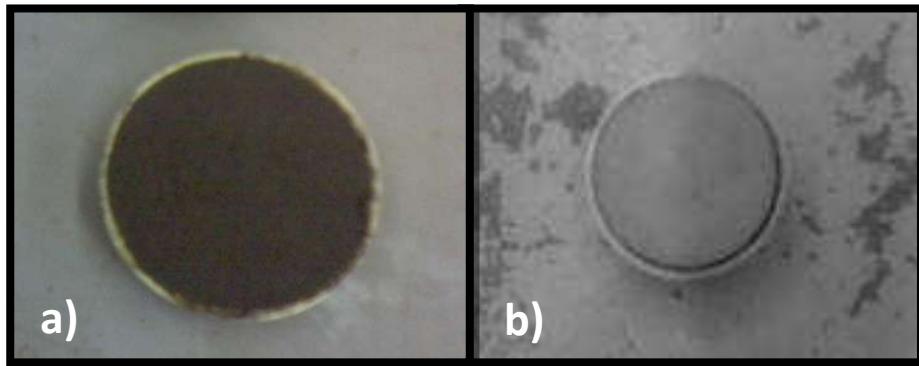


Fig. III.12

- a)** Características de la muestra húmeda dentro de la cápsula.
- b)** Características de la muestra tras un periodo de secado a temperatura ambiente.



Cuando la muestra de suelo presentó las características físicas como se aprecia en la figura III.12 b), se introdujo al horno para secarla completamente y obtener una masa constante. Luego de haber secado las muestras, estas se sacaron del horno y se les permitió enfriarse a temperatura ambiente, para finalmente pesarlas junto con el material seco, y así registrar el valor correspondiente al peso de la capsula más el suelo seco.

Por último, se determinó el volumen de la pastilla de suelo seco llenando un recipiente apropiado para la prueba con mercurio y enrasándolo perfectamente con ayuda de la placa de vidrio, luego se colocó este recipiente sobre el plato de evaporación y se depositó la pastilla de suelo sumergiéndola con las puntas de la placa de vidrio hasta que esta topo firmemente el borde del recipiente.

Cuando se sumergió la pastilla de suelo, se desplazó un volumen mercurio el cual quedo en el plato de evaporación, el mercurio que había sido desplazado fue pesado para que mediante el peso específico del mismo ($\gamma_{Hg}=13.56 \text{ g/cm}^3$) se lograra calcular el volumen correspondiente al mercurio desplazado, el cual es equivalente al de la pastilla de suelo seco.

Para el cálculo del límite de contracción se emplea la expresión siguiente:

$$LC = \frac{W_1 - W_s - (V_1 - V_2)}{W_s} \times 100$$

Siendo:

V1 = Volumen de la muestra húmeda, igual al volumen de la cápsula.

W1 = Peso de la muestra húmeda.

V2 = Volumen de la muestra seca.

Ws= Peso de la muestra seca.

III.4.1.e Determinación de la Contracción Lineal (CL).

Para el desarrollo de esta prueba se colocó dentro de una barra metálica el material de la muestra que se estaba empleando cuando se alcanzó una consistencia cercana al límite líquido, en la que había aplicado una ligera capa de aceite para impedir la adhesión de la muestra con las paredes y así permitir la libre retracción.

Al igual que en el ensayo del límite de contracción, la muestra se colocó en un lugar seguro y se le dejó secar a temperatura ambiente hasta que era evidente un cambio de color y forma, (fig. III.13).

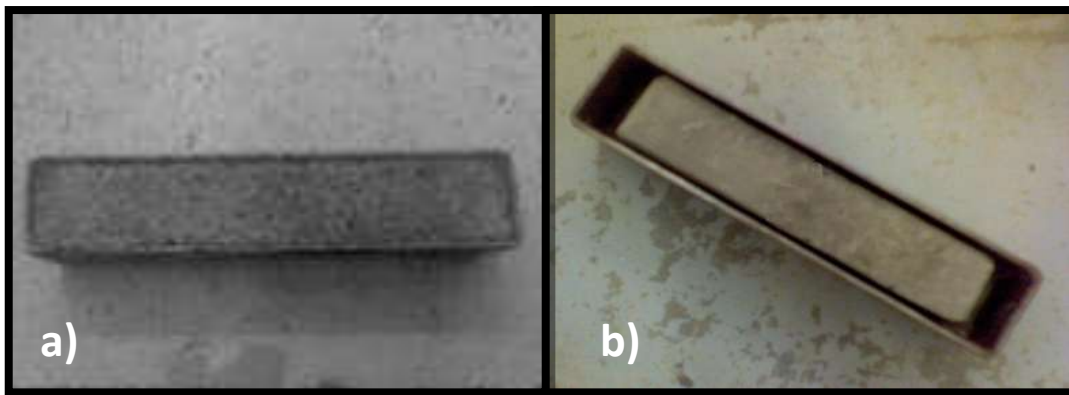


Fig. III.13

- a) Características de la muestra húmeda dentro de la barra metálica.
- b) Características de la muestra tras un periodo de secado a temperatura ambiente.

Cuando la muestra de suelo presentó las características físicas como se aprecia en la figura III.13 b), fue introducida al horno para secarla completamente y obtener una masa constante. Luego de haber secado las muestras y una vez enfriadas a temperatura ambiente, se procedió a medir la longitud de la muestra seca, registrando esta magnitud como L_{final} .

El cálculo de la contracción lineal se emplea la expresión siguiente:

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



Siendo:

$L_{inicial}$ = Longitud inicial de la muestra, igual a la longitud interior de la barra.

L_{final} = Longitud final de la muestra seca.

III.4.2 Equivalente de arena.

El equivalente de arena es considerado como un ensayo que permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. No obstante, es evidente que podemos emplear prácticamente cualquier material que pase la malla # 200 y que esté presente en el porcentaje solicitado para cumplir con los valores mínimos solicitados por norma.

Debido a que la norma define que este ensayo es exclusivo de arenas, y con el objetivo de evaluar el efecto y obtener el valor de equivalente de arena que cada filler produce, se formó una muestra compuesta de arena de 130 g, la cual cumplió con el valor promedio indicado por la Norma SCT para las cantidades máximas y mínimas retenidas por cada malla en una granulometría solicitada para cualquier número de ejes equivalentes y con tamaño nominal de agregado de 19 mm (3/4"), correspondiente a la fracción comprendida entre las mallas No. 4 y No. 200.

Mediante las consideraciones anteriores, fue posible obtener las proporciones relativas en peso de esta muestra conformada que se utilizaron, se calcularon y fueron las que se muestran en la tabla III.1.

Tabla III.1 Cálculo de las cantidades en peso retenidas por malla de la muestra compuesta de 130 g para el ensayo de equivalente de arena.

Granulometría requerida por Norma		% Equivalente en peso para arenas	Granulometría requerida para muestra conformada de 130 g		
Malla	% promedio que pasa la malla		Malla	% retenido	Retenido en peso (g)
4	42.5	100	4	0	0
10	24.5	57.65	10	42.35	55.06
20	15.5	36.47	20	21.18	27.53
40	11	25.88	40	10.59	13.76
60	8.5	20.00	60	5.88	7.65
100	6	14.12	100	5.88	7.65
200	3.5	8.24	200	5.88	7.65
charola	0	0	charola	8.24	10.71

Para que el ensayo fuera característico y representativo del filler utilizado, la fracción pétreo emplea fue lavada y secada perfectamente previo a la incorporación de cada muestra de filler, de este modo la muestra conformada cumplía con las características granulométricas solicitadas por la SCT y solo se alternaba el tipo de filler analizado, (fig. III.14).

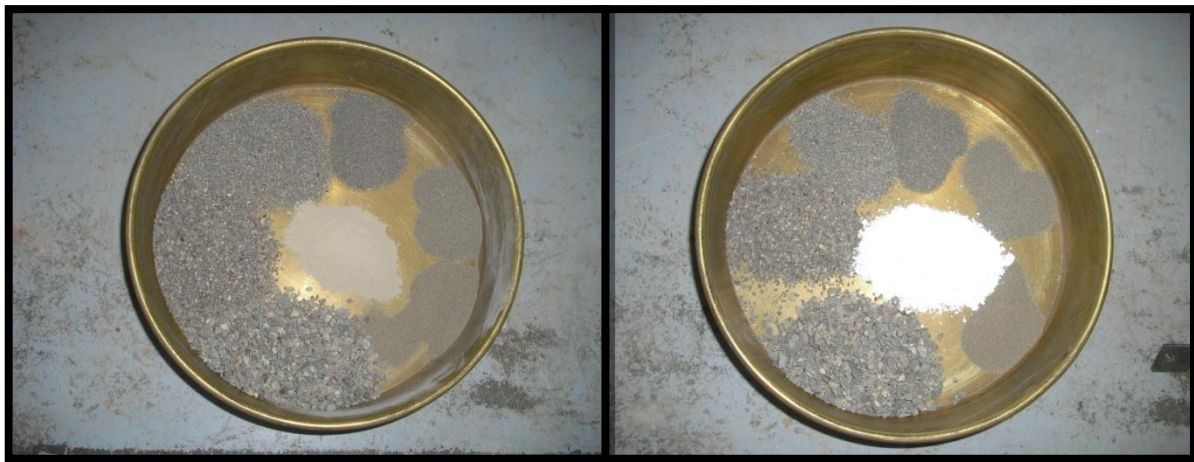


Fig. III.14 Muestras conformadas con diferente tipo de filler incorporado.

El proceso que se siguió para el ensayo y cálculo del equivalente de arena en estos materiales, fue tomado del manual “*M.MMP.4.04.004/02, Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas*”, de la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

Primeramente esta muestra granulométrica conformada se mezcló perfectamente y posteriormente se llenó la cápsula metálica de 90 ml de capacidad hasta enrasar la superficie.

La botella que contiene la solución coagulante se colocó sobre su soporte y posteriormente y mediante el sistema de sifón incorporado con la botella, se introdujo la solución en la probeta hasta una altura de 10 cm.

Con la ayuda de un embudo, se vació dentro de la probeta la muestra de material preparado en la cápsula, (fig. III.15).



Fig. III.15 Colocación del material dentro de la probeta que contiene la solución coagulante.

Una vez colocado todo el material dentro de la probeta, se golpeó en repetidas ocasiones el fondo de la misma contra la palma de la mano para eliminar las burbujas de aire atrapado y así acelerar la saturación de la muestra y se dejó reposar durante 10 minutos, (fig. III.16).



Fig. III.16Proceso de reposo durante 10 minutos

Transcurrido los 10 minutos requeridos, la probeta fue sellada mediante el tapón de hule para realizar el agitado manual durante 90 ciclos en un tiempo de 30 segundos, y con una carrera aproximada de 20 cm.

Concluida la agitación, se colocó la probeta sobre la mesa de trabajo y se le retiró el tapón. Inmediatamente y con la ayuda del tubo irrigador se procedió a realizar el lavado de las paredes interiores de la probeta, iniciando en la parte superior y concluyendo en el fondo, (fig. III.17).



Fig. III.17Lavado de las paredes de la probeta con solución coagulante.



Se continuó irrigando dentro de la probeta hasta que el nivel del líquido llegó a 38.1 cm medidos en la escala de la probeta, alcanzado este nivel, se comenzó a extraer lentamente el tubo irrigador sin cortar el flujo de la solución hasta que el nivel de la misma se mantuviera en los 38.1 cm después de haber retirado completamente dicho tubo irrigador. Posterior a lo anterior la probeta se dejó reposar durante 20 minutos.

Pasado el lapso de tiempo anterior, se midió y registro como LNS_{finos} el nivel superior de los finos en suspensión, con una aproximación de 2 mm en la escala de la probeta. En la probeta se introdujo lentamente y cuidando de no formar turbulencias la varilla con pisón hasta que la base de la misma quedo apoyada sobre el material y se observó el nivel de la parte superior del indicador en la escala de la probeta considerando una aproximación de 2 mm.

A la lectura tomada anteriormente, se le resto 100 mm (*distancia comprendida entre el indicador de la arena y la base de la varilla*) y se registró como el nivel superior de la arena LNS_{arena} . Contando con estos datos, es posible realizar el cálculo del valor de equivalente de arena.

El procedimiento anteriormente descrito, fue empleado para ensayar las doce muestras de filler, realizando dos determinaciones de equivalente de arena para cada una de ellas.

Para el cálculo del equivalente de arena, se empleó la expresión dada por el manual, la cual es:

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

Siendo:

%EA: Equivalente de arena, (*en porcentaje*).

LNS_{arena} : Nivel superior de la arena, (*en centímetros*).

LNS_{finos} : Nivel superior de los fino, (*en centímetros*).



El manual señala que cuando el equivalente de arena resulta inferior al valor solicitado por la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, para el material que se trate, el ensayo se ejecutara dos veces más utilizando la misma muestra original. Concluidos estos ensayos adicionales, el equivalente de arena a reportar será el promedio de los tres resultados calculados.

El valor mínimo de equivalente de arena especificado en la norma mencionada para los diferentes tipos de mezclas asfálticas es de un 50%. Sin embargo, y considerando lo que durante el desarrollo de la prueba se observó, el valor del equivalente de arena siempre se mantenía muy uniforme y por debajo de dicho parámetro mínimo durante el segundo ensayo con todos los filler. Sin embargo y debido a la poca cantidad de filler con que se cuenta y por lo importante que es para las pruebas futuras, se optó por dar concluida la prueba de equivalente de arena, para la que se desarrollaron únicamente dos ensayos por cada tipo de filler.

III.4.3 Determinación del pH.

Las letras pH son una mera abreviación de “*pondushydrogenii*”, traducido del latín como potencial de hidrógeno. Sorensen en 1909, introdujo el concepto para referirse a concentraciones muy pequeñas de iones hidrógeno. Puede decirse en términos muy básicos, que las sustancias capaces de liberar iones hidrógeno (H^+) son ácidas y las capaces de ceder grupos hidroxilo (OH^-) son básicas o alcalinas.

El pH es una medida de la concentración de hidrógeno expresado en términos logarítmicos. Los valores del pH se reducen a medida que la concentración de los iones de hidrógeno incrementan, variando entre un rango de 0 a 14. Los valores por debajo 7 son ácidos, valores superiores a 7 son alcalinos y/o básicos, mientras que los que rondan en 7 son denominados neutrales.



Por cada unidad de cambio en pH hay un cambio 10 veces en magnitud en la acidez o alcalinidad (*por ejemplo: un pH 6.0 es diez veces más ácido que uno de pH 7.0, mientras que un pH 5.0 es 100 veces más ácido que el de 7.0*).

El pH de un suelo es el resultado de múltiples factores, entre los que cabe destacar:

- ✕ Tipo de minerales presentes en un suelo.
- ✕ Meteorización (*de tales minerales y los que contiene la roca madre*).
- ✕ Humificación en sentido amplio (*descomposición de la materia orgánica*).
- ✕ Dinámica de nutrientes entre la solución y los retenidos por los agregados.
- ✕ Propiedades de los agregados del suelo y en especial lo que se denomina intercambio iónico.

Como se comentó dentro de la literatura referida en esta tesis, el objetivo de este ensayo como parte de la caracterización de las muestras de filler, es evaluar y determinar si efectivamente un material de naturaleza básica o alcalina presentara mayor afinidad con el asfalto y en consecuencia la adhesividad con el asfalto será mayor en comparación con un filler de naturaleza acida.

Para obtener dicho valor, fue necesario utilizar una cantidad aproximada de 150 g de cada filler en recipiente limpio y con tapa hermética.

Una vez contenido el material dentro de este recipiente, se le agregó agua destilada hasta formar una suspensión concentrada de este material e inmediatamente fue tapado, (fig. III.18)



Fig. III.18 Muestras concentradas de filler para determinar su pH.

Posteriormente, estas muestras se dejaron reposar durante tres días estando perfectamente tapadas (fig. III.19), con la finalidad de lograr una completa disolución de los iones de hidrógeno que el filler a ensayar pudiera contener, haciendo más representativo el ensayo.



Fig. III.19 Almacenamiento y reposo de las muestras concentradas de filler.

Transcurrido los tres días, se procedió a realizar la calibración del pH-metro, para realizar la evaluación del pH con las muestras concentradas de filler.

El proceso de calibración, se realizó con las soluciones buffer del equipo electrónico mediante el procedimiento descrito en el manual del fabricante del dispositivo electrónico, (fig. III.20).



Fig. III.20 Calibración del pH-metro mediante la solución buffer previo al ensayo.

Después de tener calibrado el pH-metro, la muestra concentrada de filler se agito e inmediatamente se colocó el pH-metro dentro del recipiente para realizar la lectura correspondiente al pH de la muestra. Para ello, el dispositivo se dejó dentro de la muestra por un periodo aproximado de tres minutos o hasta que la lectura reportada por éste se estabilizaba, la lectura final es la que registraba como el pH de la muestra ensayada.

Después de ensayar cada muestra, el pH-metro se lava perfectamente con agua destilada, con el objetivo de no contaminar las lecturas al momento de realizar la evaluación de la muestra siguiente.



III.4.4 Azul de metileno.

El ensayo de azul de metileno tiene por objetivo el control de la calidad de la fracción fina como un indicador del contenido de arcillas presentes en una muestra de material. El procedimiento de prueba se encuentra presente en la Normativa de la SCT en el manual “M.MMP.4.04.014/09, Azul de Metileno de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”, sin embargo, este ensayo es requerido por la Normativa SCT cuando se trata de mezclas asfálticas de granulometría discontinua, Tipo SMA.

Dado que es un ensayo de mayor control de la calidad de los finos, se decidió aplicar dicha prueba para los filler que considera la presente investigación, a fin de correlacionar los resultados obtenidos con las pruebas de plasticidad y equivalente de arena.

El azul de metileno (*un colorante catiónico*), es una sustancia que reacciona con lo aniones orgánicos de las partículas con que se mezcla, formando sales hidrofóbicas de color azul intenso. Es un método que se caracteriza por ser muy sencillo y exclusivo para la fracción del pulverulenta o filler (partículas menores a 0.075 mm), lo que lo hace más preciso que el ensayo de equivalente de arena, ya que se observó que éste deja de ser eficiente ante un elevado contenido de partículas más finas.

El método de ensayo, consiste en añadir una muestra de material fino dosis controladas de azul de metileno, comprobando la absorción de solución colorante por la muestra sobre papel de fieltro para detectar la presencia de colorante libre en cada dosis ensayada. El ensayo se repite las veces que sean necesarias hasta que las partículas de material fino no absorban más azul de metileno. Mientras más azul de metileno retenga la muestra de finos, estos serán más activos, lo cual proporciona un índice indirecto de su potencialidad expansiva.

El proceso que se siguió para el ensayo de azul de metileno de los doce tipos de filler elegidos en esta investigación, fue tomado de la Norma Europea “UNE-EN 933-9:1999” y el manual de la SCT “M.MMP.4.04.004/02, Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas”.



El ensayo se realizó en el laboratorio de asfaltos de la empresa LASFALTOSA de CV, en la ciudad de Guadalajara, Jal., donde contaban con la solución colorante de azul de metileno debidamente preparada, por lo que únicamente se prepararon las muestras de filler a ensayar.

Para el ensayo, se tomó una muestra de filler de 220 g que fue secada en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C durante 24 horas, la cual una vez transcurrido el periodo de secado, se le permitió enfriarse a temperatura ambiente para poder utilizarla en el ensayo.

Primeramente se depositaron 500 ml de agua destilada dentro de un vaso de precipitado con volumen de 2 litros y posteriormente se le adiciono los 220 g de la muestra de filler preparada. Esta solución fue colocada en un agitador mecánico, y se homogenizó durante 5 minutos con una velocidad de agitación de 600 ± 60 revoluciones por minuto (rpm). Transcurrido el periodo de tiempo anterior, se redujo la velocidad de agitación a 400 ± 40 rpm. Esta velocidad de agitación, se mantuvo constante durante el tiempo de ensayo.

Se añadieron 5 ml de solución colorante de azul de metileno con la bureta dentro de la mezcla de filler y agua destilada que se encontraba agitando a una velocidad de 400 ± 40 rpm. Se le permitió homogenizarse durante 1 minuto para posteriormente tomar una gota del fondo del vaso de precipitado mediante la varilla de vidrio, y depositarla sobre el papel de fieltro.

Como en el primer ensayo, la prueba de coloración resulto dar una mancha azul oscuro sobre el papel fieltro, la cual estaba rodeada de una aureola incolora, se le agregaron 5 ml de solución colorante a la mezcla de filler y agua destilada, y se realizó una segunda determinación contando un minuto de por homogenización desde dicha adición.

Este ultima parte del ensayo, se repitió tantas veces hasta que apareció sobre el papel de fieltro una aureolaalrededor de la mancha con un tonalidad azul másclara y un espesor de aproximadamente 1 milímetro.A partir de ese momento se hace referencia al tiempo de la última adición de solución colorante como tiempo cero. Por tanto, la aparición de la aureola color azulclaro se considera que ha tenido lugar en el primer minuto.



El ensayo se dio por finalizado hasta que la aureola permaneció durante 5 minutos, es decir, si en el segundo, tercero, cuarto y quinto minuto desde la última adición de solución colorante continuó apareciendo la aureola azul clara con un espesor de 1 mm aproximadamente. En caso de que esta desapareciera, se volvía a adicionar otros 5 ml a la muestra.

Comprobado que la aureola se mantuvo durante los cinco minutos y con un espesor constante de 1 mm, se registró el volumen de colorante añadido como V_1 .

Para el cálculo del valor de azul de metileno, **MB** (*Methylene Blue*), el cual se expresa en gramos de colorante por kilogramo de la fracción granulométrica de 0 a 2 mm (equivalente al material que pasa la malla No. 200), se emplea la siguiente expresión:

$$MB = \left(\frac{V_1}{M_1} \right) \times 10$$

Siendo:

MB: Azul de metileno, (g/Kg).

V_1 : Volumen de solución colorante añadida, (ml).

M_1 : Masa de la muestra de ensayo, (g).

La norma indica que el valor calculado para el azul de metileno debe de ser redondeado a la décima de gramo más próxima de colorante empleado por kilogramo.



III.5 Estudios de caracterización no tradicional aplicados al filler

Las pruebas utilizadas en esta etapa de análisis, comprenden el empleo de equipos modernos y que son utilizados para la investigación y desarrollo en materiales cerámicos, geología y mineralogía principalmente. Con base en la literatura se observó la importancia de evaluar e identificar los parámetros que se pueden obtener los equipos empleados.

Es importante destacar que por lo delicado en el manejo de estos equipos, en algunos casos solo se tuvo participación en la preparación de las muestras, el resto del proceso, que consiste en operar los equipos e imprimir los resultados, fue desarrollado por los técnicos responsables de la operación de los mismos. Los ensayos y procedimientos desarrollados, se describen a continuación.

III.5.1 Análisis granulométrico de partícula fina.

Es por todos conocidos que mediante la granulometría podemos obtener la distribución de los distintos tamaños de partículas que componen una determinada muestra, lo que nos permitiría conocer la frecuencia de las partículas para cada intervalo de tamaño, y de este modo tener una idea más clara de la finura que presentan los diferentes tipos de filler a emplear en una mezcla asfáltica. Lo anterior también permitiría hacer una clara correlación entre las cantidades de asfalto solicitadas para cubrir adecuadamente dichas partículas, puesto que mientras más finas sean, su área específica será mayor y en consecuencia la cantidad de asfalto también.

Esta prueba fue desarrollada mediante el equipo de difracción de partículas con láser analizador de tamaño modelo *LS 100Q* de la marca COULTER, el cual se encuentra en laboratorio de materiales cerámicos del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas (*IIM*) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (*UMSNH*), en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Para el ensayo de los materiales, primeramente se preparó una muestra representativa de cada uno de los diferentes tipos de filler en frascos que contenían una muestra aproximada de 200 g, (fig. III.21).



Fig. III.21 Muestras representativas de cada material para realizar el ensayo de granulometría fina.

Las muestra fueron llevadas al laboratorio donde se encuentra el equipo, previo al ensayo, fue necesario realizar la calibración del equipo, la cual se realiza mediante un comando atreves del software cargado en la PC que controlo al mismo. Este proceso es necesario para obtener los resultados adecuados del tamaño de las partículas finas que se van a analizar, (fig. III.22).



Fig. III.22 Equipo COULTER LS 100Q de difracción de partículas con láser analizador de tamaño.

Una vez preparado el equipo, en la computadora se registraron los datos correspondientes a la identificación del filler que estaba por ensayarse, a fin de que estos aparecieran en el reporte de resultados generados. Se tomó una muestra de aproximadamente 40 g y se colocó dentro del depósito que el equipo tiene para el ingreso de la muestra, (fig. III.23).

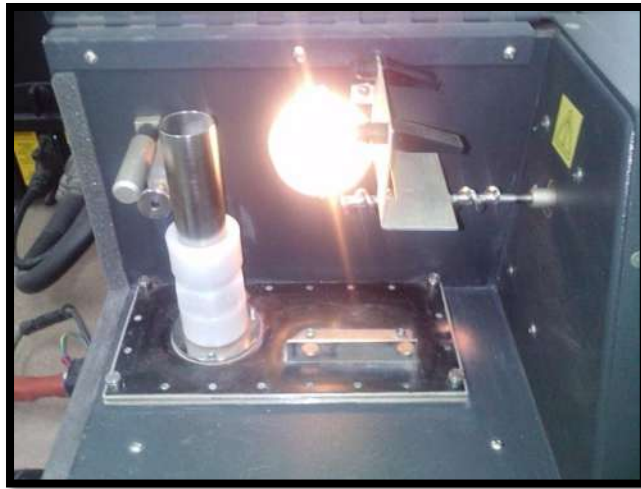


Fig. III.23 Ubicación del depósito en el equipo para las muestras a ser ensayadas.

Posteriormente y mediante la PC, se da inicio a la prueba. El software cargado en la PC, se encarga de controlar al equipo durante la etapa de análisis, así como de registrar los datos que se están generando para la muestra analizada, (fig. III.24)

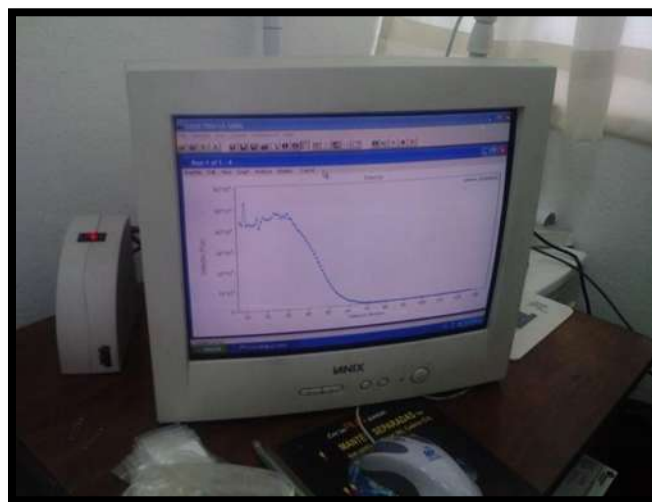


Fig. III.24 Obtención y registro en la PC de la información generada para la muestra durante el ensayo.



Finalmente, el software del equipo se encarga de generar un reporte, en el cual se presenta la información correspondiente a la muestra, dicho reporte proporciona valores como el volumen diferencial de los tamaños de las partículas analizadas, información estadística de la muestra y las gráficas de la distribución granulométrica de la misma.

III.5.2 Microscopia Electrónica de Barrido (*MEB*).

El límite de resolución de un microscopio óptico convencional viene determinado por la longitud de onda con la que se ilumina el objeto. La base de la microscopia electrónica es la utilización como fuente de luz un delgado haz de electrones acelerados, que se hace incidir sobre la muestra, lo cual permite la observación a detalle de la morfología y a su vez el desarrollo de un análisis cualitativo y semicuantitativo de la misma.

Debido a los sistemas de detección para diferenciar las distintas energías electrónicas con que cuenta el equipo, es posible llevar a cabo una correcta caracterización de la muestra mediante la radiación resultante entre el haz de electrones y la muestra, permitiendo obtener imágenes de apariencia tridimensional de la muestra y realizar un microanálisis químico semicuantitativo mediante la espectrometría de dispersión de longitudes de onda.

Esta prueba fue llevada a cabo mediante un microscopio electrónico de barrido modelo JSM 6400 de la marca JEOL, el cual se encuentra en el laboratorio de Investigación, Ciencia de Materiales e Ingeniería del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas (*IIM*) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (*UMSNH*), ubicado también en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Para el ensayo de los materiales, primeramente se preparó una muestra representativa de cada uno de los diferentes tipos de filler en sobres que contenían aproximadamente de 10 a 20 g de cada material, (fig. III.25).



Fig. III.25Muestras representativas de cada filler para el ensayo de microscopia electrónica de barrido.

Una vez preparadas las muestras y previo al ensayo, estas recibieron un tratamiento de metalización para que pudieran ser analizadas por el microscopio y la prueba se logra realizar adecuadamente, esto debido a que se tratan de materiales de origen mineral y no poseen ningún metal en su estructura, no sería posible obtener la imagen por la falta de interacción entre los electrones proyectados sobre la muestra.

Realizado el proceso de metalización, se encendió el equipo y las muestras fueron colocadas en su posición para lograr realizar el análisis. El equipo empleado para este ensayo se muestra en la figura III.26



Fig. III.26Microscopio electrónico de barrido empleado para el análisis de las muestras.

Con el apoyo del Ingeniero encargado de operar el equipo, fue posible tomar las imágenes de cada una de las muestras de filler analizadas, y obtener el espectro resultante del microanálisis químico de la muestra, (fig. III. 27).



Fig. III.27 Encargado de la operación del microscopio electrónico de barrido durante el ensayo.

Como resultados de esta prueba, se obtuvieron cuatro fotografías de una misma muestra pero a diferentes aumentos, así un microanálisis químico semicuantitativo mediante la espectrometría de dispersión de longitudes de onda.

III.5.3 Difracción de Rayos X (DRX).

Los rayos X interactúan con la materia a través de los electrones que la forman y que se están moviendo a velocidades mucho menor que la de la luz, cuando la radiación electromagnética X alcanza un electrón cargado, éste se convierte en una fuente de radiación electromagnética secundaria dispersada. Estas iteraciones dan lugar a diferentes procesos físicos en el material, como pueden ser: refracción, absorción, fluorescencia, dispersión rayleigh, dispersión compton, polarización, reflexión, difracción, entre otros.



Resulta ser que la difracción de rayos X es el único método que permite determinar de modo exacto, la estructura molecular de cualquier material, debido a que todas las propiedades físicas y químicas de éste dependen de cómo se encuentran organizadas las unidades de menor tamaño (átomos y moléculas), lo cual facilita su identificación.

Como las muestras a analizar son partículas finas, y el método de difracción de rayos X para el análisis depende del tipo de muestra: monocristales o policristales (polvo cristalino). El registro del espectro difractado por muestras policristalinas puede realizarse empleando dos dispositivos experimentales con características bien definidas:

- ✕ Método Fotográfico (Cámara de Debye-Scherrer)
- ✕ Difractómetro de Polvo.

La diferencia radica en el registro, pues en el método fotográfico, el espectro se registra en una película fotográfica, en la cual, la densidad de ennegrecimiento indica la intensidad de las radiaciones reflejadas. Mientras que en el difractómetro de polvo, se obtiene un registro gráfico de las señales que las reflexiones originan sobre los detectores electrónicos de radiación, resultando ser un método más sencillo y eficiente en cuanto a la interpretación de resultados.

Este ensayo fue desarrollado mediante un equipo difractómetro marca *SIEMENS* modelo *D5000*, y al igual que en las prueba anterior, el equipo se encuentra dentro del laboratorio de Investigación, Ciencia de Materiales e Ingeniería del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas (*IIM*) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (*UMSNH*), ubicado también en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Para esta prueba, por la finura requerida por el equipo para realizar una adecuada difracción, fue necesario cribar cada uno de los diferentes fillera través de la malla No. 400 (*0.038 mm*). Una vez cribado este material, se preparó una muestra representativa de cada uno de los polvos minerales en frascos pequeños que contenían aproximadamente 50 g de cada material.

Previo al ensayo, la muestra se colocaba dentro de una pastilla metálica de manera uniforme mediante una espátula, (fig. III. 28).



Fig. III.28 Colocación de la muestra en la pastilla metálica previo al análisis de difracción de rayos X.

Una vez llenada la pastilla metálica con el material, se procedió a enrasar y eliminar los residuos de la superficie hasta dejar un acabado liso, esto se desarrolló mediante una placa de cristal, (fig. III. 29).



Fig. III.29 Enrasado y nivelación de la superficie de la muestra para el ensayo.

Posteriormente se encendió el equipo de difracción y se dejó preparando por un lapso de 15 minutos, esto previo al primer ensayo, en los ensayos posteriores este paso se omitía. El equipo empleado para el ensayo, es el que se muestra en la figura III.30.



Fig. III.30Equipo de difracción de rayos X empleado para el ensayo.

Terminado el proceso anterior, la pastilla que contenía la muestra de filler era colocada en el interior de la cámara, dentro de un soporte que la sujeta firmemente a un brazo rotatorio, (fig. III.31).

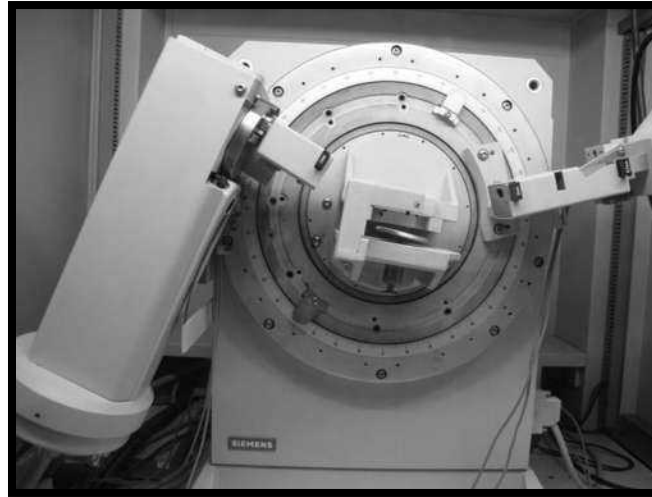


Fig. III.31 Espacio en el que se coloca la pastilla con el material preparado para el análisis.

Después de esto, se cierra la ventana de la cámara y desde la computadora, se definen los parámetros de operación para el desarrollo del análisis, los cuales son:

Angulo Teta: 20°	Angulo 2Teta: 40°
Incrementos en la velocidad de escaneo: 0.02 seg.	Velocidad del escaneo: 0.6 seg.
Rango de análisis para la muestra: de 5° a 70°	

Luego de haber definido los parámetros, desde la computadora se da inicio al proceso de radiación y obtención del espectro de difracción mediante el software instalado en la misma.

Terminada la etapa anterior, se analiza el espectro de difracción resultante en la computadora. Primeramente se realiza un ajuste por ruido y se procede a una comparación con diferentes tarjetas mineralógicas existentes en una base de datos mineralógica para identificar por comparación la o las estructuras mineralógicas que presenta la muestra analizada, (fig. III.32).

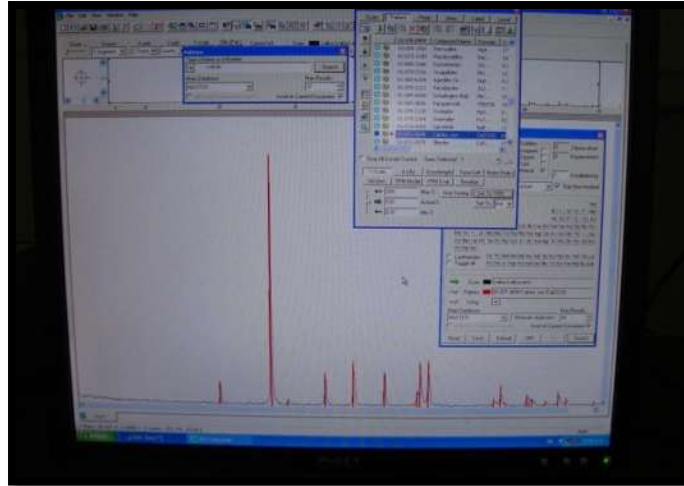


Fig. III.32 Identificación de las fases cristalinas para la muestra a través de tarjetas mineralógicas.

Una vez que se han identificado las fases cristalinas de la muestra analizada, se realiza la impresión de los resultados obtenidos, en el que se incluye la información básica de los parámetros de análisis, los minerales presentes, la composición química y proporción de éstos en la muestra, así como la estructura cristalina que presenta.

III.6 Estudio de la influencia del tipo de filler ante el efecto térmico, la humedad y el envejecimiento del mástico mediante el método UCL®.

El Método universal de caracterización de ligantes (UCL®) fue desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña por los doctores Pérez Jiménez y Miró Recasens. Basado en la aplicación del ensayo cántabro, es un procedimiento directo y sencillo que evalúa las propiedades funcionales de los asfaltos a partir de la determinación del grado de cohesión que proporciona a una mezcla patrón y de la observación de cómo esta cualidad varía con la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento.



El ensayo resulta fácil de desarrollar y ofrece ser una novedosa herramienta para clasificar y cotejar los distintos asfaltos, ya que permite diferenciar el comportamiento de entre estos, incluso en aquellos que poseen propiedades similares según la caracterización tradicional.

El procedimiento recibe el nombre de universal por la capacidad de ser aplicable a cualquier asfalto. El principio del ensayo 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 asfaltos han de aportar al comportamiento de las mezclas asfálticas: cohesión, susceptibilidad térmica, adhesividad y resistencia al envejecimiento.

✘ **Cohesión-temperatura: Curva de estado del asfalto**

Variando la temperatura a la que se realiza el ensayo puede obtenerse la curva de estado del asfalto, que puede considerarse como su curva de identidad, ya que define la variación de su comportamiento, desde inconsistente, a altas temperaturas, a frágil, a bajas temperaturas. La mayor o menor pendiente de esta curva de estado nos indica la susceptibilidad del asfalto a los cambios de temperatura y está relacionada con su índice de penetración.

✘ **Adhesividad**

El asfalto, además de ser capaz de envolver los áridos dando cohesión a la mezcla, debe resistir la acción de desenvuelta del agua. Por efecto del agua, el asfalto tiende a separarse del agregado y en consecuencia disminuye la cohesión de la mezcla. Mediante el ensayo cántabro se puede evaluar la adhesividad agregado-asfalto, determinando las pérdidas de la mezcla cuando ésta se ensaya en seco tras haber permanecido cierto tiempo sumergida en agua. El incremento de las pérdidas está directamente relacionado con la mejor o peor adhesividad del asfalto al árido.



⌘ **Envejecimiento**

La valoración del envejecimiento por el método UCL® se basa en determinar la evolución de la resistencia a la disgregación de la mezcla, a medida que se va produciendo el envejecimiento del asfalto. Dada la alta porosidad de la granulometría empleada, el asfalto envuelve las partículas de árido con una película muy fina, que es la que se somete a un proceso de oxidación a 163 °C, durante diferentes periodos de tiempo.

El ensayo UCL® puede evaluar el efecto del filler sobre las propiedades del asfalto, tanto determinando las pérdidas a distintas temperaturas (*susceptibilidad térmica*), como mediante la determinación de las pérdidas en seco y tras inmersión (*adhesividad*) o las ocurridas tras el envejecimiento. De ahí la aplicación para este estudio.

El objetivo de la aplicación de esta metodología a la mezcla de filler-asfalto, fue para evaluar las propiedades funcionales del mástico a partir de la determinación del grado de cohesión que proporciona a una mezcla patrón y de la observación de cómo esta cualidad varía ante la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento del mismo.

Para el desarrollo del presente estudio y a fin de lograr el objetivo planteado, evaluar la influencia del mástico formado con cada tipo de filler, se utilizó una mezcla patrón, en la que se emplearon los mismos materiales y las mismas proporciones en peso de estos para formar la probeta tipo Marshall, pero solo se varió el tipo de filler.

Las características granulométricas y las cantidades en peso de los materiales que se emplearon para formar las probetas tipo Marshall, se muestran en la tabla III.2.



Tabla III.2 Proporciones de los materiales utilizadas para la fabricación de las probetas tipo Marshall.

PROPORCIÓN	MATERIAL	PROPORCIÓN POR PROBETA
80 %	FRACCIÓN GRUESA (2.38 mm a 4.75 mm)	720 grs
20%	FRACCIÓN FINA (0.59 mm a 2.38 mm)	180 grs
$\frac{FILLER}{ASFALTO} = 0.61$	ASFALTO	41 grs
	FILLER	25 grs

Es importante comentar, que las granulometrías utilizadas corresponden a las más cercanas descritas por el método, lo anterior debido a que en España utilizan los tamices de acuerdo a la clasificación UNE, y las aberturas son ligeramente diferente en comparación con los utilizados por ASTM, que corresponden a los tamices utilizados para este ensayo.

La relación filler-asfalto que se decidió utilizar en este ensayo, es la mínima que comúnmente suele estar presente dentro de las mezclas asfálticas comúnmente fabricadas, además de que fue la única que permitió desarrollar el mezclado entre el asfalto y el filler, ya que cuando se probó con una proporción de filler-asfalto más alta (0.9) se observó que el mezclado era casi nulo con algunos polvos minerales.

Para fracción pétreo requerida como parte del ensayo, fue necesario realizar un muestreo en el banco de materiales de AGC, de la cual se obtuvieron muestras de arena y fracciones más finas, que nos permitieran obtener fácilmente las granulometrías requeridas, (fig. III. 33).



Fig. III.33 Muestreo en banco de materiales para la obtención de la fracción pétreo.

Una vez contando con el material pétreo, se inició el proceso de cribado hasta obtener las cantidades requeridas por cada fracción pétreo para la fabricación de las 612 probetas tipo Marshall. Completado el material, este fue lavado perfectamente hasta dejarlo exento de todo material fino que se encontrara adherido al mismo; secado sobre una superficie perfectamente limpia y almacenándolo en costales que impidieran su contaminación con partículas finas, (fig. III.34).

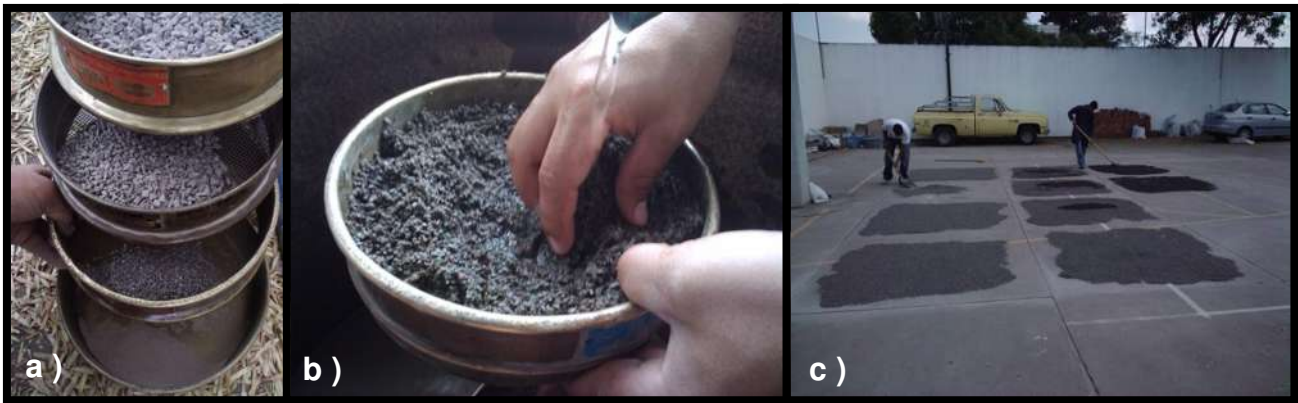


Fig. III.34

- a) Cribado y separación de las fracciones requeridas para el ensayo.
- b) Lavado de las fracciones necesarias para la fabricación de las probetas.
- c) Secado de las fracciones pétreas previo a su empleo.

Es importante mencionar, que toda el agua empleada durante el proceso de lavado no fue desperdiciada, ya que esta fue captada en un recipiente y distribuida en las diferentes áreas verdes aledañas al laboratorio de materiales, (fig. III.35).



Fig. III.35 Captación del agua empleada para el proceso de lavado y su disposición final.

Después de los procesos de pre-acondicionamiento en algunos de los materiales pétreos, se estuvo en condiciones de iniciar con la fabricación de las probetas tipo Marshall para el desarrollo del método UCL®. Para la fabricación de las probetas tipo Marshall, se utilizaron los moldes y el compactador correspondiente a dicho ensayo, (fig. III.36).



Fig. III.36 Compactador y moldes Marshall empleados para la fabricación de las probetas de ensayo.

La mezcla se fabricó luego de que la fracción gruesa del pétreo estuviera 24 horas dentro del horno a 160 ± 5 °C, para eliminar cualquier cantidad de humedad y facilidad en el mezclado con el asfalto. Para cuando faltaban 4 horas por concluir el periodo de secado, a las charolas que contenían la fracción gruesa, se les adicionaba la cantidad correspondiente al polvo mineral o filler y el asfalto era introducido también al horno para que permanecieran 4 horas bajo la misma condición de precalentamiento, (fig. III.37).



Fig. III.37 Precalentamiento de los agregados pétreos y los moldes Marshall.

Es importante mencionar, que los moldes empleados en la fabricación de las probetas tipo Marshall, también se introdujeron al horno con las muestras de agregado pétreo con la finalidad de evitar el choque térmico durante el proceso de compactación debido al diferencial de temperatura que existiría.

Una vez que había pasado el lapso de tiempo por precalentamiento, se daba inicio el proceso de mezclado, para ello, se adicionaba la cantidad de asfalto especificada en la charola que contenía los agregados pétreos, y posteriormente eran mezclados perfectamente con ayuda de una espátula, durante este proceso de mezclado, se continuaba conservando la temperatura mediante una parrilla de gas, la cual evitaba que la mezcla perdiera calor, y hacia representativo el envejecimiento del asfalto debido al proceso de mezclado, (fig. III.38).



Fig. III.38 Adición del asfalto a los agregados pétreos y mezclado de los mismos.

Una vez que se tenían perfectamente mezclado los materiales, se vertía la mezcla dentro de los moldes Marshall y estos eran colocados en el compactador, donde se les compacto con 50 golpes por cada una de las caras de la probeta, (fig. III.39).



Fig. III.39 Compactación de la mezcla de asfalto, filler y agregados potros mediante el compactador Marshall.

Una vez que se aplicaron los 50 golpes en cada cara de la probeta, esta se le permitía enfriarse a temperatura ambiente por un tiempo aproximado de 30 minutos, transcurrido ese tiempo, se procedía a retirarla del molde, quedando como producto final una probeta tipo Marshall elaborada con un tipo de filler, las cuales se identificaban y almacenaban (fig. III.40).



Fig. III.40 Identificación y almacenamiento de las probetas tipo Marshall fabricadas.

Cuando se tuvieron todas las probetas fabricadas por cada tipo de filler, se procedió a realizar los ensayos para las tres condiciones de análisis: susceptibilidad térmica, susceptibilidad a la humedad y susceptibilidad al envejecimiento.

III.6.1 Evaluación de la susceptibilidad térmica.

Para la evaluación de la susceptibilidad térmica, se definieron 6 temperaturas de análisis (-15, 5, 25, 40, 55 y 70 °C, $\pm 2^\circ\text{C}$) a las que deberían de ensayarse las probetas. Para ello se ensayaron tres probetas tipo Marshall de cada filler por cada una de las seis temperaturas de análisis, para ello, las probetas se sometieron a cada una de las temperaturas designadas por un periodo de 4 horas, el cual se considera tiempo suficiente para que todas las partículas de la probeta alcance de manera uniforme la temperatura de ensayo, (fig. III.41).



Fig. III.41 Exposición de las probetas elaboradas con cada tipo de filler a las diferentes temperaturas de ensayo.

Transcurrido el tiempo de exposición a las diferentes temperaturas, la probeta que iba a ser ensayada, se retira del ambiente térmico al que se encontraba expuesto e inmediatamente se pesaba, el peso se registraba como P_i (peso inicial) y se anotaba el tipo de filler al que correspondía.

Una vez registrada la probeta, esta se introducía inmediatamente dentro de la máquina de los ángeles sin la carga abrasiva y recibía 300 ciclos a razón de 32 revoluciones por minuto. Una vez que se cumplía con el proceso de impacto y abrasión, la probeta o el fragmento de probeta más grande, se retiraba de la máquina y cuidadosamente se eliminaban los residuos que pudieran estar adheridos aun a la pastilla, se pesaba nuevamente y este peso se registraba como P_f (peso final), (fig. III.42).



Fig. III.42 Pesado de la probeta tipo antes y después del ensayo en la máquina de los ángeles.



El proceso de someter a impacto y abrasión cada probeta de filler después de haber sometido la probeta a la temperatura de análisis definida, se repito para todas las muestras de filler que se afectaron térmicamente por las seis diferentes temperaturas. El resultado final de este proceso, fue la obtención de las curvas de estado de cada filler para este intervalo de temperatura, las cuales pueden ser fácilmente comparadas y visualizar gráficamente el desempeño de un filler con respecto a otro u otros.

III.6.2 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad.

Para la evaluación de la susceptibilidad a la humedad, las probetas que se ensayarían para las 6 temperaturas de análisis (-15, 5, 25, 40, 55 y 70 °C, $\pm 2^{\circ}\text{C}$), se les aplico un proceso previo al ensayo, el cual es parte esencial de esta evaluación. Este proceso de acondicionamiento, consistió en someter todas las probetas destinadas para esta evaluación, a un baño María a $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, (fig.III.43)



Fig. III.43 Probetas sometidas a baño María a $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas como parte del acondicionamiento.

Después de estar 24 horas dentro del baño María, las probetas se retiraban y se les permitía eliminar el exceso de agua contenida en su interior durante 24 horas y a temperatura ambiente. Transcurrido este tiempo, las probetas se consideran listas para ensayarse a las diferentes temperaturas de análisis propuestas.



Al igual que en la evaluación anterior, las probetas se sometían por lapsos de 4 horas a la temperatura de ensayo, se registraba su pesos inicial antes de iniciar el proceso de impacto y abrasión y el peso final para cuando este proceso concluía.

El resultado de esta evaluación a la humedad, corresponde a las mismas temperaturas que se analizaron por susceptibilidad térmica. Es importante comentar, que durante el primer desarrollo de este ensayo, se obtuvieron resultados no esperados que proporcionaban una mala interpretación, debido a las variaciones de temperatura que el equipo de baño María presento. Por lo que fue necesario fabricar nuevas pastillas y repetir completamente esta parte del análisis, sin embargo, solo se evaluaron 4 temperaturas de las seis (-15, 25, 55 y 70 °C, ± 2 °C) que se habían propuesto, esto por la falta de tiempo y lo tedioso de la fabricación y preacondicionamiento de las probetas.

El resultado final de este proceso, fue la obtención de las curvas de estado de cada filler para un intervalo de temperatura, pero con probetas que fueron afectadas mediante el agua, lo que las hacia diferente de las que se afectaron térmicamente. Como se tienen los mismos intervalos de temperatura, las gráficas pueden ser comparadas y visualizar el desempeño de un filler con respecto a otro u otros y el desempeño que presenta tras un proceso de saturación.

III.6.3 Evaluación de la susceptibilidad al envejecimiento.

Para la evaluación del efecto por envejecimiento, las probetas que fueron ensayadas por cada filler se sometieron a una temperatura de $165 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 5 diferentes periodos de tiempo (2, 4, 8, 16 y 32 horas). Pero previo al efecto de envejecimiento por temperatura, las probetas se acondicionaron para evitar que desintegraran por la temperatura tan elevada a la que se someterían.

El acondicionamiento de las probetas, consistió en cortar una malla metálica con las dimensiones adecuadas para lograr envolverla y, mediante un trozo de alambre sujetar dicha malla a la sección de estas, de manera tal que a pesar de que la probeta se ablandara por efecto de la exposición a la temperatura ésta no se deformara y cambiara la geometría con que se elaboró, (fig. III.44).

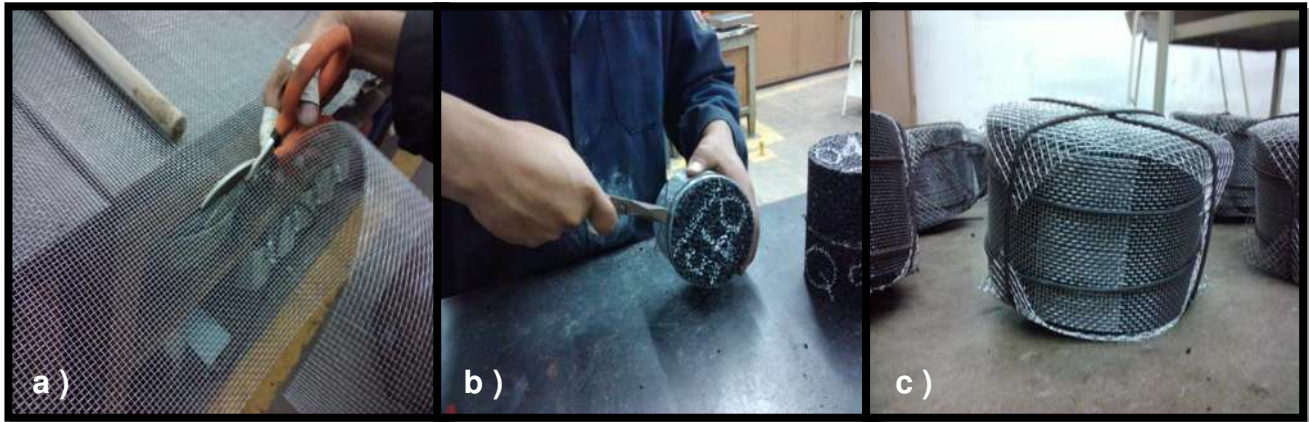


Fig. III.44

- a) Cortado de la malla metálica para confinamiento de las probetas.
- b) Sujeción de la malla a la sección de la probeta.
- c) Condición final de las probetas tras protegerlas con la malla metálica.

Preparadas las probetas con la malla metálica, estas fueron introducidas al horno de ventilación forzada, y a partir de ese momento, se da inicio al conteo para los periodos de envejecimiento designados, (fig. III.45).



Fig. III.45 Probetas introducidas al horno para proceso de envejecimiento.



Es importante comentar, que a fin de evitar escurrimientos y acumulación del asfalto en la base de la probeta, estas eran volteadas cada 2 horas, así se garantizaba que no habría pérdidas en el asfalto por efecto del escurrimiento.

Una vez completado el tiempo de envejecimiento, las probetas eran retiradas del horno y se les permitía enfriarse a temperatura ambiente. Una vez frías, se remarcaba la clave de identificación, se pesaban y se registraba el peso inicial de la probeta, se sometía al igual que en las evaluaciones anteriores a 300 ciclos de impacto y abrasión, una vez completado, se retiraban de la máquina de los ángeles y se volvían a pesar, el peso correspondiente se registraba como peso final de la probeta.

Este proceso de impacto y abrasión se repitió para todas las probetas tras ser envejecidas. El resultado de esta evaluación, fue la obtención de la curva de estado que describe el comportamiento del mastico tras diferentes periodos de envejecimiento.

Completadas las tres evaluaciones anteriores, el ensayo por el método de UCL se daba por terminado, solo restaba realizar los cálculos correspondientes al porcentaje de pérdidas obtenidos por cada probeta en las evaluaciones realizadas, el cual se determinó mediante la expresión siguiente:

$$P_d = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) \times 100$$

Siendo:

P_d : Pérdidas por desgaste al cántabro, (%).

P_i : Peso inicial de la probeta, (g).

P_f : Peso final de la probeta, (g).



III.7 Estudio del efecto del tipo de filler en las propiedades reológicas del mástico mediante el reómetro de corte dinámico (*DSR*).

Las mezclas asfálticas están compuestas por agregados pétreos gruesos y arenas de diferentes tamaños, filler mineral y asfalto, principalmente, el filler y el asfalto forman una mezcla llamada “mástico” (Sistema filler-asfalto), que ocupa los espacios entre el agregado pétreo.

El mástico es el componente formado por la mezcla del asfalto y el filler contenidos en una mezcla asfáltica. Actualmente para la caracterización de la resistencia ante ciertas fallas comunes en los pavimentos asfálticos como deformaciones permanentes o roderas, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico, se realizan estudios reológicos en el asfalto (metodologías SUPERPAVE y otras).

Es posible que el estudio reológico de la mezcla asfalto-filler ofrezca buena información sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas ante las fallas anteriormente mencionadas, ya que esto trabajan en conjunto al recibir una carga en el pavimento y el aporte del filler al comportamiento reológico del asfalto puede ser muy importante en parámetros reológicos como viscosidad, recuperación elástica, módulo reológico, ángulo de fase, etc.

Como parte de esta fase de estudio, se llevó a cabo la caracterización del cemento asfáltico AC-20 que se empleó para la prueba del método UCL®, mediante el reómetro de corte dinámico DSR (Figura III.46), con el fin de evaluar su contribución a resistir las deformaciones plásticas en la mezcla, con base en la medición de los parámetros reológicos (*Módulo complejo en corte G^* y el Ángulo de fase δ*).



Fig. III.46 Reómetro de corte dinámico (*DSR*) empleado para la caracterización del mástico.

Los ensayos se practicaron a cada uno de los doce másticos elaborados con el asfalto AC-20, los cuales se formaron con la misma relación filler-asfalto (0.61) utilizada en el método UCL®.

Mediante el empleo de diferentes metodologías, se obtuvo un espectro amplio del comportamiento de cada mástico formado, en primer lugar se determina la viscosidad dinámica mediante barridos de frecuencia y se busca una adaptación para las metodologías de Viscosidad a Corte Cero y Creep Repetido Multiesfuerzo, además se introduce la variación en parámetros como velocidad y esfuerzo de corte, esto para estimar la dependencia del comportamiento del asfalto y el mástico ante estas condiciones.

Este “mástico” es el responsable de muchas de las propiedades de la mezcla asfáltica, siendo este el principal aglomerante de la mezcla asfáltica y participando de manera importante en el desempeño de ésta, con características como cohesión, estabilidad, impermeabilidad, resistencia ante la deformación permanente y la fatiga, entre otras.

El equipo reómetro de corte dinámico (*DSR*) y el personal técnico especializado en la operación del mismo, fue proporcionado por la empresa LASFALTOSA de CV, ubicada en la ciudad de Guadalajara, Jal. Gracias al apoyo de ésta, fue posible estudiar y comparar la influencia que tiene el tipo de filler en las propiedades reológicas del “mástico”, empleando pruebas oscilatorias.



En este laboratorio, fue posible realizar la caracterización del asfalto empleado para los ensayos los equipos y procedimientos descritos por la SCT en el manual “*M-MMP-4-05-025/02 Módulo Reológico de Corte Dinámico*”.

Antes de fabricar las mezclas se envejeció el asfalto por RTFO ya que durante el mezclado de asfalto y filler en laboratorio, no se genera la oxidación que se generaría durante la producción de la mezcla en caliente. Después, cada uno de los tipos de filler se mezcló con la cantidad de asfalto correspondiente para obtener la relación filler-asfalto requerida (0.61).

Se fabricaron pastillas de 25 mm de diámetro, las cuales servirían para realizar el ensayo en el equipo DSR. El procedimiento de mezclado consistió en calentar el filler y el asfalto a una temperatura de 150 °C, el filler se agregó gradualmente al asfalto, adicionando primeramente una porción, mezclándolo con ayuda de una espátula hasta que desaparecieron los grumos, observándose en todos los casos una buena dispersión del filler.

Los materiales se mantuvieron calientes en el horno y finalmente se agregó el resto de filler, para nuevamente mezclar hasta lograr una adecuada dispersión.

Los másticos se mantuvieron en el horno para la fabricación de pastillas, mezclándose con la espátula continuamente para evitar una posible separación o segregación.

Al elaborar las pastillas para reología se metieron inmediatamente al congelador, también para evitar la separación, aunque no se observaron diferencias de comportamiento entre las pastillas dejadas enfriar a temperatura ambiente, en el refrigerador y en el congelador.

Es importante comentar, que para la relación de filler-asfalto utilizada se tuvieron algunos problemas durante el mezclado y la elaboración de las pastillas, esto porque debido a las características del filler, no fue posible su mezclado.



En el análisis reológico se emplearon pruebas oscilatorias para determinar el módulo complejo G^* y Viscosidad compleja η^* para determinar la deformación en función del tiempo. Se empleó la geometría de platos paralelos con un espesor de muestra de 1 milímetro.

Para el ensayo de módulo complejo G^* y Viscosidad compleja (η^*) las pruebas se llevaron a cabo con una frecuencia de 10 rad/s, controlando por deformación a 10%, y para las temperaturas de 52, 58, 64, 70, 76 y 82 °C.

Debido a lo delicado y complejo del equipo empleado para este análisis reológico, no se tuvo participación en el proceso de ensayo, solo se efectuó la observación durante la etapa de ensayo de las pastillas de mástico, para lo que se llevó el registro de los parámetros definidos para la evaluación y calibración del equipo.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

- IV.1 Estudios de caracterización tradicional aplicados al filler.
 - IV.1.1 Plasticidad
 - IV.1.2 Equivalente de arena
 - IV.1.3 Determinación del pH
 - IV.1.4 Azul de metileno
- IV.2 Estudios de caracterización no tradicional aplicados al filler.
 - IV.2.1 Análisis granulométrico de partícula fina
 - IV.2.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB)
 - IV.2.3 Difracción de rayos X (DRX)
- IV.3 Estudio de la influencia del tipo de filler ante el efecto térmico, la humedad y el envejecimiento del mástico mediante el método UCL®.
 - IV.3.1 Evaluación de la susceptibilidad térmica
 - IV.3.2 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad
 - IV.3.3 Evaluación de la susceptibilidad al envejecimiento
- IV.4 Estudio del efecto del tipo de filler en las propiedades reológicas del mástico mediante el reómetro de corte dinámico.
 - IV.4.1 Evaluación del módulo complejo (G^*)
 - IV.4.2 Evaluación de la viscosidad compleja (η^*)



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo anterior se definieron las pruebas que comprenden este proyecto de investigación y los objetivos planteados por cada una de ellas. Por lo extenso de los resultados obtenidos y la cantidad de muestras analizadas, en el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos por cada ensayo y se desarrollan posibles correlaciones entre los resultados obtenidos que pueden justificar los comportamientos y valores obtenidos.



IV.1 Estudios de caracterización tradicional aplicados al filler

IV.1.1 Plasticidad.

Como se mencionó en el capítulo anterior, la plasticidad es un parámetro originado por el contenido de partículas más finas y de forma laminar. Cabe mencionar que en las mezclas asfálticas tiene una especial importancia la fracción de tamaño inferior a $75\mu\text{m}$, llamada, como se ha indicado, polvo mineral o filler, pues algunas características relevantes de la mezcla dependen del mástico formado por la unión del polvo mineral y del cemento asfáltico.

Los resultados obtenidos por la evaluación de este parámetro se resumen en la carta de plasticidad siguiente (fig. IV.1), en la cual se ubican los diferentes polvos minerales o filler.

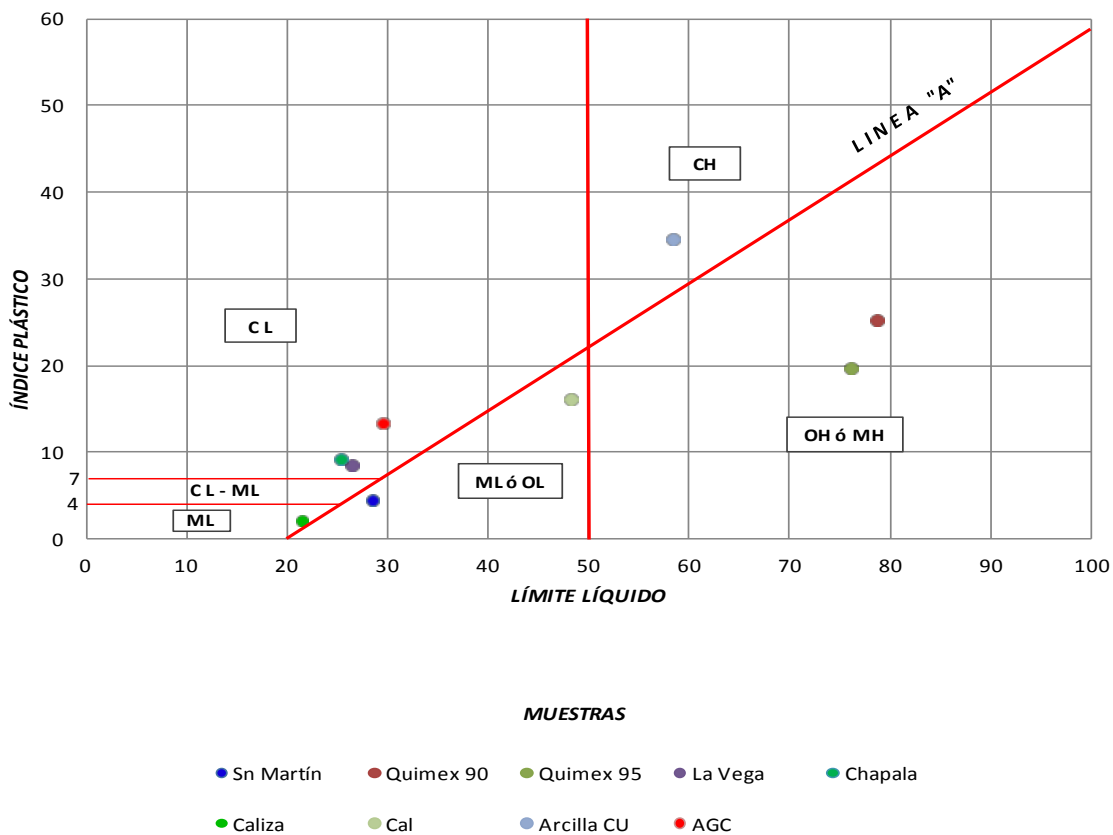


Fig. IV.1 Ubicación de los diferentes tipos de filler en la carta de plasticidad.



Los materiales de los bancos Cerritos, Los Federales y el Cemento Portland, no aparecen en la carta de plasticidad debido a que por sus características y el resultado obtenido para este ensayo, se definen como materiales no plásticos.

Con los resultados obtenidos para cada una de las muestras de polvo mineral mediante el ensayo de plasticidad, se demuestra que los materiales empleados corresponden a diferentes calidades y se logra abarcar las cuatro zonas de la carta de plasticidad, complementado también con materiales de naturaleza no plástica.

En este ensayo se identificó y corroboró la calidad de la arcilla obtenida de las canchas de CU, la cual fue definida en un inicio como arcilla expansiva basándose en la observación de sus características físicas y el comportamiento presentado durante el contacto con el agua y la ausencia de esta.

A pesar de que los polvos minerales Quimex 90 y Quimex 95 son de origen industrial y, de los cuales sabemos, son hidróxidos de calcio, es interesante que ambos resulten ser materiales OH de acuerdo a la carta de plasticidad, mientras que la cal de tipo comercial, que también es un hidróxido de calcio, resulte ser un ML en la misma carta de plasticidad.

Es muy probable que la clasificación SUCS obtenida para dichos materiales inorgánicos de origen industrial sea debido a la finura de sus partículas, la morfología de las partículas finas o las características mineralógicas de los mismos, los cuales son parámetros sensibles para un análisis por plasticidad.

La clasificación SUCS obtenida para los hidróxidos de calcio y la diferencia en los resultados obtenidos por los polvos Quimex y la cal comercial, que poseen la misma estructura cristalina por ser cales hidratadas, ponen de manifiesto que un análisis de plasticidad no es lo suficientemente confiable para garantizar la calidad de un polvo mineral aunque este sea de origen industrial, ya que el ensayo resultó ser influenciado por la finura de las partículas y el proceso químico que se desarrolla cuando la cal entra en contacto con el agua.



Es poco probable que algunos polvos minerales usados en la construcción reaccionen como la cal ante la presencia del agua y presenten estados de consistencia semejantes a los de una arcilla, aun cuando se sabe que la incorporación de estos en los agregados pétreos propicia una mejora en el comportamiento mecánico de las capas de pavimento, por lo que es recomendable la implementación de pruebas adicionales que permitan definir su comportamiento dentro de una mezcla asfáltica.

Queda claro que el ensayo de plasticidad es una referencia adecuada de la calidad y el comportamiento futuro de los agregados pétreos ante la presencia del agua, lo que nos permite fácilmente seleccionar el agregado. Sin embargo es importante complementar este ensayo con pruebas adicionales que no se vean afectadas por el proceso desarrollado mediante la hidratación, que como en el caso de los hidróxidos de calcio ocurre, a pesar de ser materiales de buena calidad.

Si se desea consultar con mayor detalle los resultados de los estados de consistencia obtenidos por cada muestra de polvo mineral, el reporte de los resultados obtenidos por cada muestra de polvo mineral, estos se encuentran en el apartado de anexos, en el subtema correspondiente a plasticidad.



IV.1.2 Equivalente de arena.

Como se mencionó en el capítulo *III.4.2 Equivalente de Arena*, el ensayo es considerado por la normativa SCT como un ensayo que permite determinar el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas. Sin embargo y con base en los resultados obtenidos por este ensayo mediante las consideraciones presentadas en el capítulo referido anteriormente, se comprobó la falta de la idoneidad del ensayo para cumplir con el objetivo principal que indica su definición.

Los resultados obtenidos de valor de equivalente de arena mediante la variación del polvo mineral en una muestra patrón, se resumen en el grafico siguiente, (fig. IV.2).

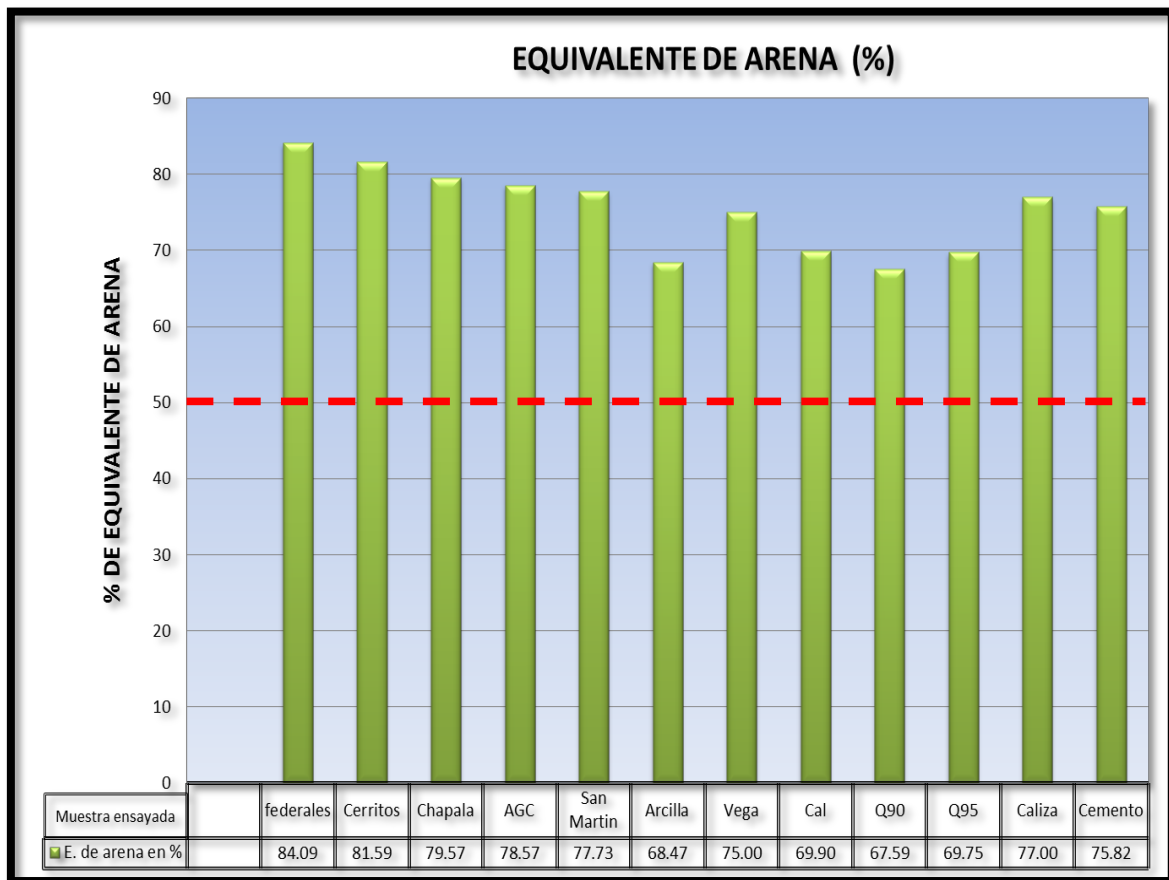


Fig. IV.2 Ubicación de los diferentes tipos de filler en la carta de plasticidad.



Es importante mencionar que las muestra patrón fue conformada mediante el valor promedio especificado por norma para una mezcla asfáltica densa elaborada en caliente para cualquier número de ejes equivalentes y un tamaño nominal de agregado de 19 mm (3/4"). Por lo que los resultados obtenidos de cada ensayo corresponden únicamente a la variación de cada tipo de polvo mineral empleado.

Al trazar una línea de manera horizontal en el valor correspondiente al 50% del equivalente de arena (eje de las ordenadas) en el gráfico anterior, siendo el 50 % el valor correspondiente al mínimo solicitado por la norma SCT. Observamos claramente que todos los materiales cumplen con el requisito mínimo solicitado en este ensayo.

Con los resultados obtenidos mediante esta prueba y las consideraciones tomadas para formar la muestra patrón, queda expuesto que sin importar el origen del agregado o su contenido orgánico contenido dentro de los agregados pétreos, como lo es la arcilla, estos cumplirán fácilmente con el valor especificado por norma, lo que justifica observar cómo carpetas asfálticas conformadas con materiales que cumplen con la norma pero presentan un contenido dematerial arcilloso tienden a deteriorarse rápidamente al estar en presencia de agua, en la figura siguiente se muestra un claro ejemplo de lo que ocurre sobre las calles de Morelia tras una temporada de lluvias.



Fig. IV.3 Deterioro de las calles de Morelia durante época de lluvias, como consecuencia de la presencia de arcilla en el agregado pétreo.



Mediante los resultados obtenidos por este ensayo con cada uno de los polvos minerales, se demuestra que el ensayo de equivalente de arena no es lo suficientemente confiable para evaluar la presencia de material indeseable dentro de los agregados pétreos, sin importar que se encuentre presente en proporciones pequeñas.

Adicional a los comentarios anteriores, es posible observar que no existe una relación directa entre los valores de equivalente de arena y el tipo de polvo mineral según su clasificación SUCS, ya que la variación en cuanto al equivalente de arena de uno y otro filler poco o nada nos dice acerca de las naturaleza del polvo mineral contenido en la muestra de agregado pétreo.

Como resultado de este ensayo, es recomendable el empleo de un nuevo método de ensayo que permita caracterizar adecuadamente la fracción fina del agregado, que sea de un procedimiento fácil y sencillo que no pierda su objetividad mediante los resultados obtenidos para garantizar la calidad de los agregados pétreos y la ausencia de materiales potencialmente indeseables, como lo son las arcillas.

A pesar de que la normativa SCT cuanta con el procedimiento de prueba de azul de metileno, es un requisito que se especifica solo para los agregados pétreos que se emplearan para mezclas asfálticas de granulometría discontinua (*tipo SMA*) y no por las mezclas asfálticas de granulometría densa, las cuales como se ha mencionado, son las más comúnmente empleadas en la construcción de nuestras carreteras.

Investigaciones recientes demuestran que el ensayo de azul de metileno es más idóneo que el equivalente de arena para estimar el grado de reactividad de los materiales finos y su potencial expansivo.

Dicho ensayo se caracteriza por ser sencillo y más preciso, pues el ensayo de equivalente de arena deja de ser eficiente ante un elevado contenido de partículas más finas.

Como complemento a los requisitos anteriores existe el ensayo de azul de metileno, que es una prueba específica para los polvos minerales o filler la cual permite controlar particularmente a esta fracción pulverulenta.



IV.1.3 Determinación del pH.

La acidez es por lo general consecuencia de un alto contenido en sílice en las partículas pétreas, de acuerdo a la literatura que se refiere en el capítulo *II.6.1.d Agregados Ácidos*, la adhesividad entre los agregados silíceos (*o ácidos*) y el cemento asfáltico no es buena, pudiendo llegar a ser necesaria la disminución de la tensión superficial del asfalto mediante procesos de activación. Sin embargo ocurre lo contrario cuando este entra en contacto con agregados pétreos de naturaleza básica.

El objetivo de la prueba fue contar con el valor del potencial de hidrogeno y observar en las pruebas aplicadas al mastico, si efectivamente existe una relación entre el valor del pH de la muestra y su resistencia ante procesos de impacto, abrasión, susceptibilidad térmica, a la humedad y el proceso de envejecimiento del asfalto.

Los resultados obtenidos de la evaluación del pH de las doce muestras de filler, se resumen en la tabla IV.1 siguiente.

Tabla IV.1 Valores de pH obtenidos para cada muestra de filler.

POLVO MINERAL O FILLER	pH
Banco AGC	7.59
Banco Cerritos	8.51
Banco Chapala	8.96
Banco La Vega	7.92
Banco Los Federales	8.58
Banco Sn. Martín	8.11
Arcilla de las Canchas de CU	7.27
Agregado de Piedra Caliza	13.08
Cal Comercial	13.26
Cemento Portland	12.68
Quimex 90 (<i>Hidróxido de Calcio</i>)	13.35
Quimex 95 (<i>Hidróxido de Calcio</i>)	13.36



Gráficamente los resultados se pueden interpretar de manera más adecuada, para ello se presenta el grafico siguiente:

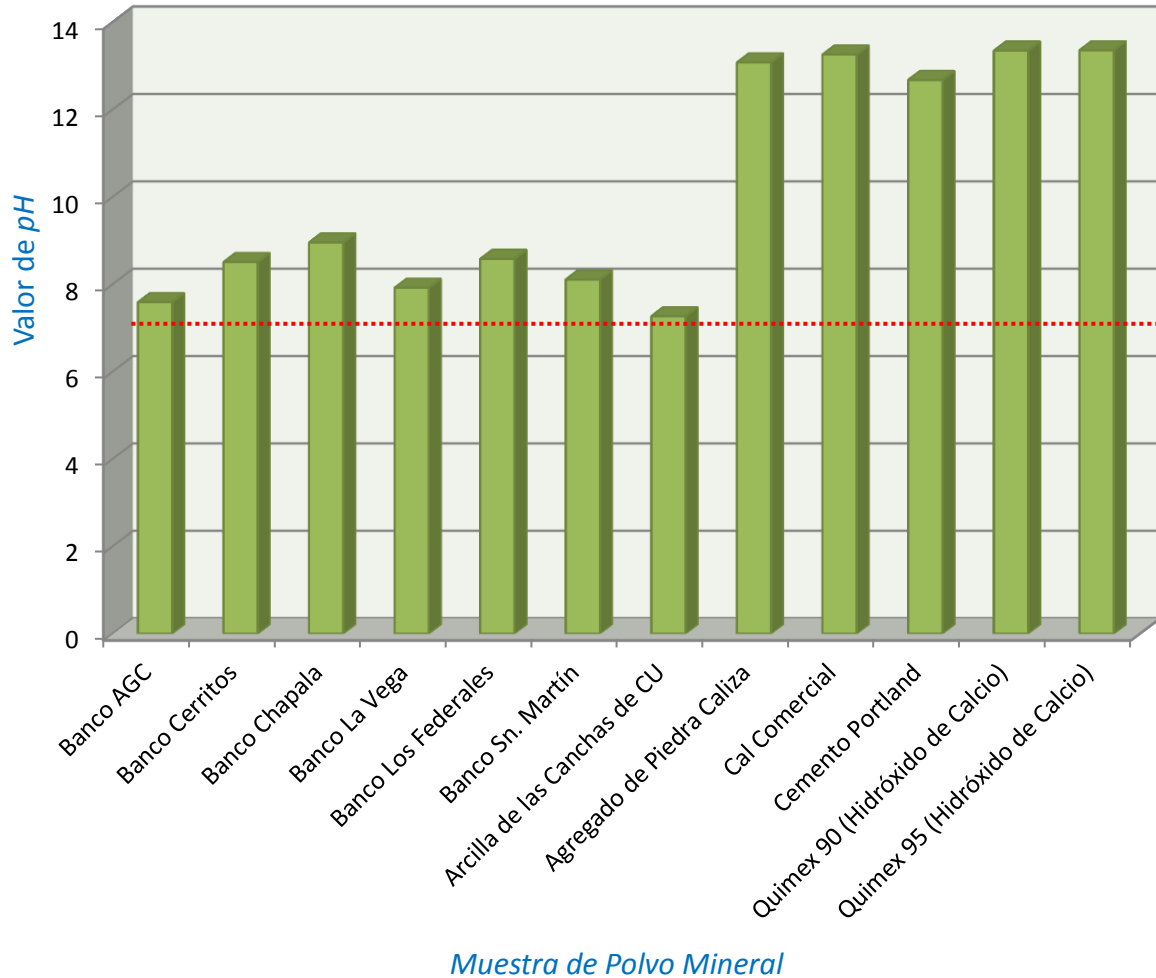


Fig. IV.4 Valores de pH obtenidos en casa una de las muestras

Es posible trazar una línea horizontal en la figura IV.4 gráfica anterior, para el valor correspondiente a siete (7) de pH (eje de las ordenadas), el cual corresponde a un pH neutro que es la frontera entre los valores ácidos y básicos. Por arriba de esta línea se localizan los valores correspondientes a agregados de naturaleza básica o alcalina, mientras que por debajo de dicha línea se ubican aquellos de naturaleza ácida.



Los resultados obtenidos demuestran que todas las partículas de polvo mineral van de un valor de pH cercano al neutro (agregados de recuperación) hasta unos muy alcalinos.

Adicional a lo anterior, se observa que no existen agregados de naturaleza acida en las muestra de polvo mineral, por lo que muy probablemente el efecto de la adhesividad entre los agregados de naturaleza acida y básica no se verá muy marcado con las muestras de polvo mineral que se analizan.

Mediante este ensayo se expone que los valores de potencial de hidrogeno más altos corresponden a los productos de origen industrial o productos de procesos industriales, sin embargo, el agregado de piedra caliza puede considerarse como un agregado mineral natural, ya que el único proceso industrial que recibe previo a su comercialización es la trituración y pulverización de la roca caliza.

De los resultados obtenidos, es posible identificar que las muestras que se ensayaran corresponden principalmente a polvos minerales de naturaleza básica, sin embargo todos estos se distribuyen a través de este rango. Con base en la literatura, se espera que la afinidad entre estos y el asfalto mayor en aquellos a los que corresponden valores de pH más elevado.



IV.1.4 Azul de metileno.

Como se ha logrado demostrar mediante los ensayos anteriores, al haber concluido el ensayo y tras haber efectuado el cálculo para determinar el valor de azul de metileno por cada muestra, se presentan los resultados obtenidos por cada uno de los polvos minerales o filler en la tabla IV.2.

Tabla IV.2 Valores de azul de metileno obtenidos para cada muestra de filler.

POLVO MINERAL O FILLER	<i>Azul de Metileno</i>
Banco AGC	17
Banco Cerritos	4
Banco Chapala	17
Banco La Vega	16
Banco Los Federales	4
Banco Sn. Martín	20
Arcilla de las Canchas de CU	72
Agregado de Piedra Caliza	3
Cal Comercial	1
Cemento Portland	1
Quimex 90 (<i>Hidróxido de Calcio</i>)	1
Quimex 95 (<i>Hidróxido de Calcio</i>)	1

De acuerdo con la norma de la SCT “N.CMT.4.04/08 *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*”, el valor máximo de azul de metileno indicado para mezclas asfálticas de granulometría discontinua tipo SMA, es de 12 mg/g. Al graficar lo valores anteriores observamos lo siguiente:

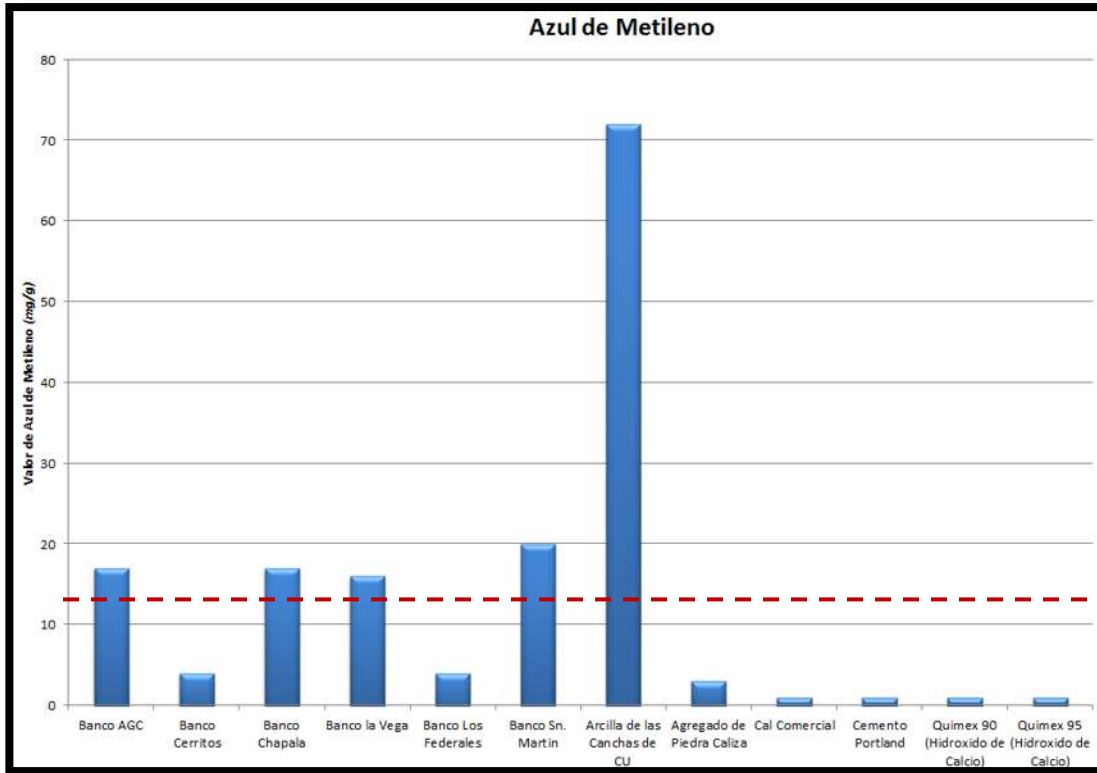


Fig. IV.5 Valores de Azul de Metileno obtenidos para cada muestra de polvo mineral o filler.

Como puede observarse en el grafico anterior, los resultados nos indican que los materiales que con anterioridad había pasado la prueba de equivalente de arena, resultan ser activos y en consecuencia implica que poseen minerales de arcilla.

Observamos también, que los materiales de los bancos cerritos y los federales, ofrecen valores adecuados y pueden asemejarse a la reactividad presentada por los agregados de origen industrial (*cemento, agregado calizo, cal e hidróxidos de calcio*).

Podemos observar que el valor correspondiente a la arcilla de las canchas de CU es el más alto en comparación con el resto, lo cual mediante esta prueba refleja su alta capacidad expansiva a diferencia de lo obtenido mediante el ensayo de equivalente de arena, en la que sin problemas supero el valor mínimo requerido por Norma.

Si graficamos los valores de azul de metileno y los correspondientes al valor de equivalente de arena, obtenemos el siguiente gráfico:

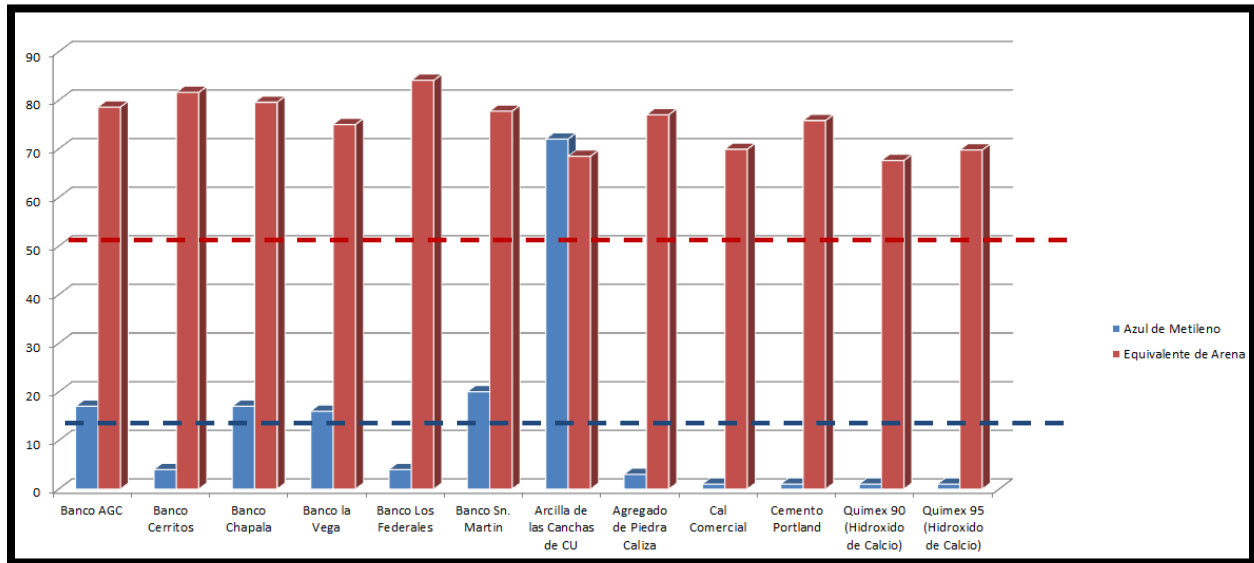


Fig. IV.6 Comparación entre los Valores de Azul de Metileno y los valores obtenidos mediante el ensayo de equivalente de arena por cada muestra de filler.

Si comparamos los valores límite requerido por cada ensayo respecto de los valores obtenidos por cada muestra, observamos que no existe correlación alguna, ya que el valor de equivalente de arena como se comentó anteriormente, parece ser poco representativo de las características mineralógicas del polvo mineral que posee.



IV.2 Estudios de caracterización no tradicional aplicados al filler

IV.2.1 Análisis granulométrico de partícula fina.

Los resultados obtenidos como parte de esta prueba, fue una serie de graficas en las que se aprecia la distribución granulométricas de estas partículas, sin embargo y para que se puedan comparar las diferencias granulométricas de cada material, se presenta la gráfica en la que se dibujan los resultados de todas las muestras, (fig. IV.7).

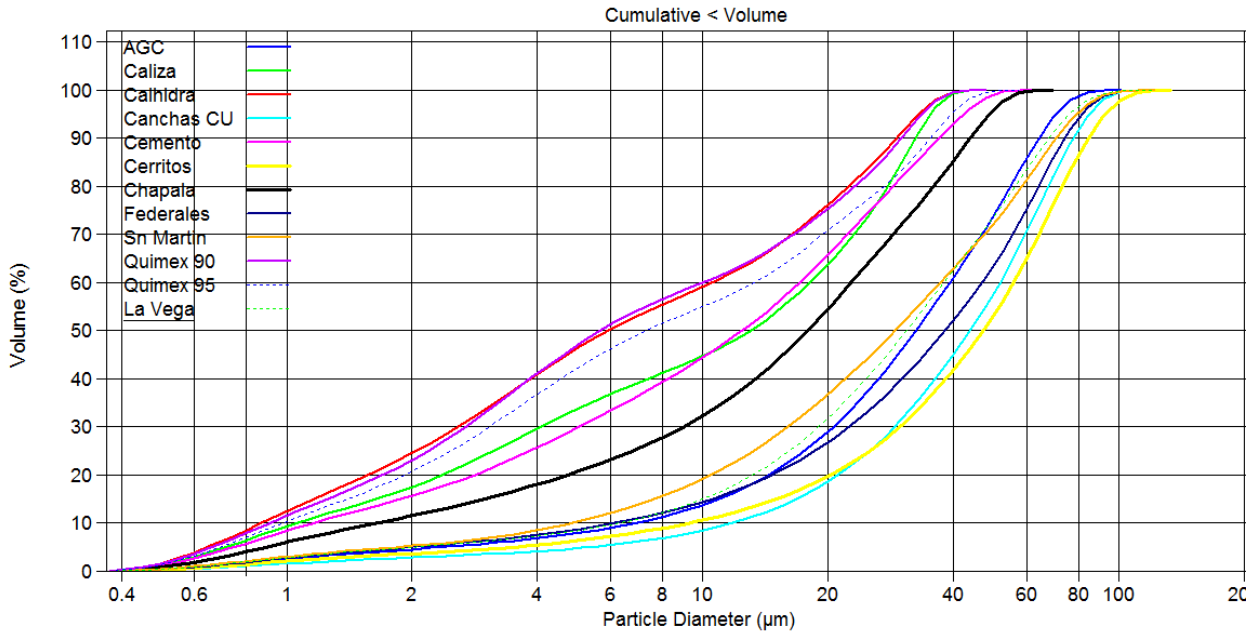


Fig. IV.7 Gráfica de la distribución granulométrica acumulada de tamaños de partícula.

El grafico anterior, es posible identificar que las muestras de polvo mineral se distribuyen de una forma muy particular a pesar de ser todas las muestras inferiores a 0.075 mm. Sin embargo es posible identificar que algunas muestras presentan distribuciones granulométricas semejantes, a pesar de ser de naturalezas diferentes.



La observación anterior se ve más clara cuando se observa la gráfica de la figura IV.8 siguiente.

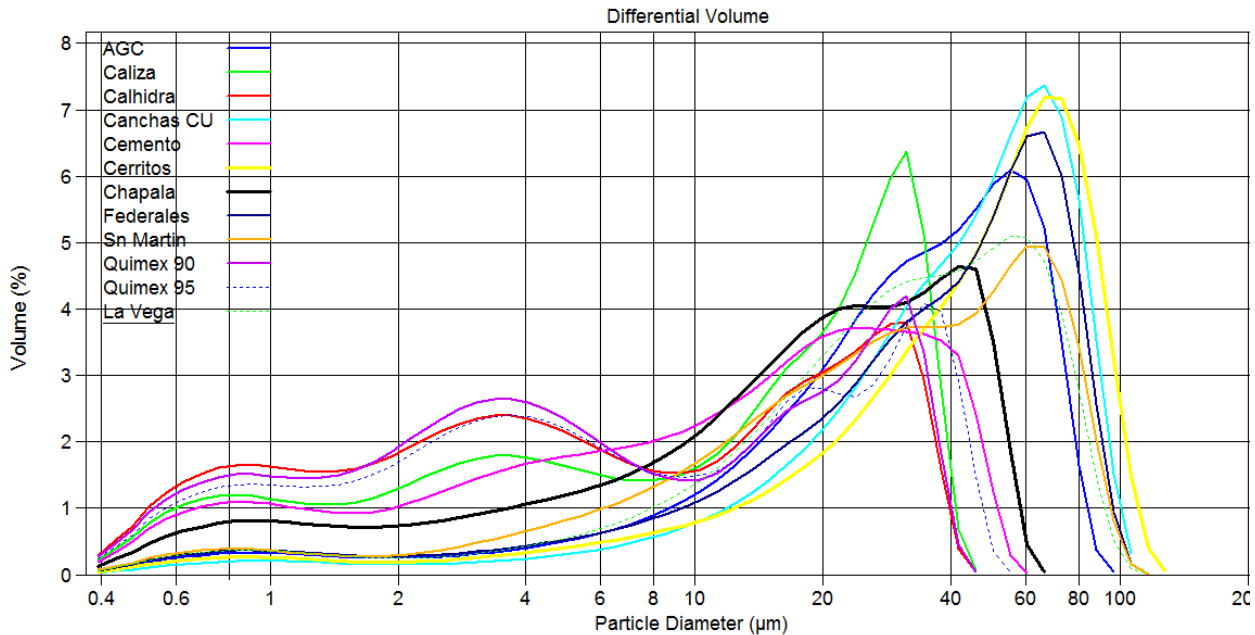


Fig. IV.8 Gráfica de la distribución granulométrica diferencial de tamaños de partícula.

En este gráfico, queda más marcada la distribución de los tamaños de partículas, así como los tamaños para los que se concentran los mayores contenidos de partículas finas.

Sin embargo es posible observar que puede existir un error en la distribución granulométrica obtenida para la arcilla, pues esta presenta que la mayor parte de sus partículas presentan tamaños que oscilan entre las 0.040 y 0.075 mm, lo cual puede parecer absurdo, debido a que las partículas de arcilla son de tamaños aún más pequeños.

La justificación para que se haya obtenido dicho valor mediante esta prueba, puede obedecer a que la misma se realizó bajo condiciones secas, por lo que es muy probable que las partículas hayan estado aglomeradas, formando partículas de mayor tamaño.



Es resultado permite recomendar para las futuras líneas de investigación mediante ensayos similares, se practique dicho análisis bajo una condición húmeda, en la que se posible dispersar en su totalidad todas las partículas, y así obtener un valor más representativo de las características granulométricas de las muestras analizadas.

Observamos también, que todos los polvos de origen industrial, presentan una tendencia en los tamaños de partículas, las cuales tienden a ser muy finas en comparación con los polvos de recuperación, pues estos presentantamaños de partículas con diámetros de entre 0.020 y 0.040 mm, mientras que los de recuperación oscilan entre los 0.040 y 0.075 mm.

IV.2.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

Este ensayo a diferencia de los anteriores, en los que se obtenían valores cuantitativos de los polvos minerales, resulta ser más de carácter cualitativo de las muestras analizadas. De las fotografías que se tomaron a diferentes aumentos, solo se presentan aquí las de mayor detalle para realizar una analogía de lo obtenido por el ensayo, (fig. IV.9).

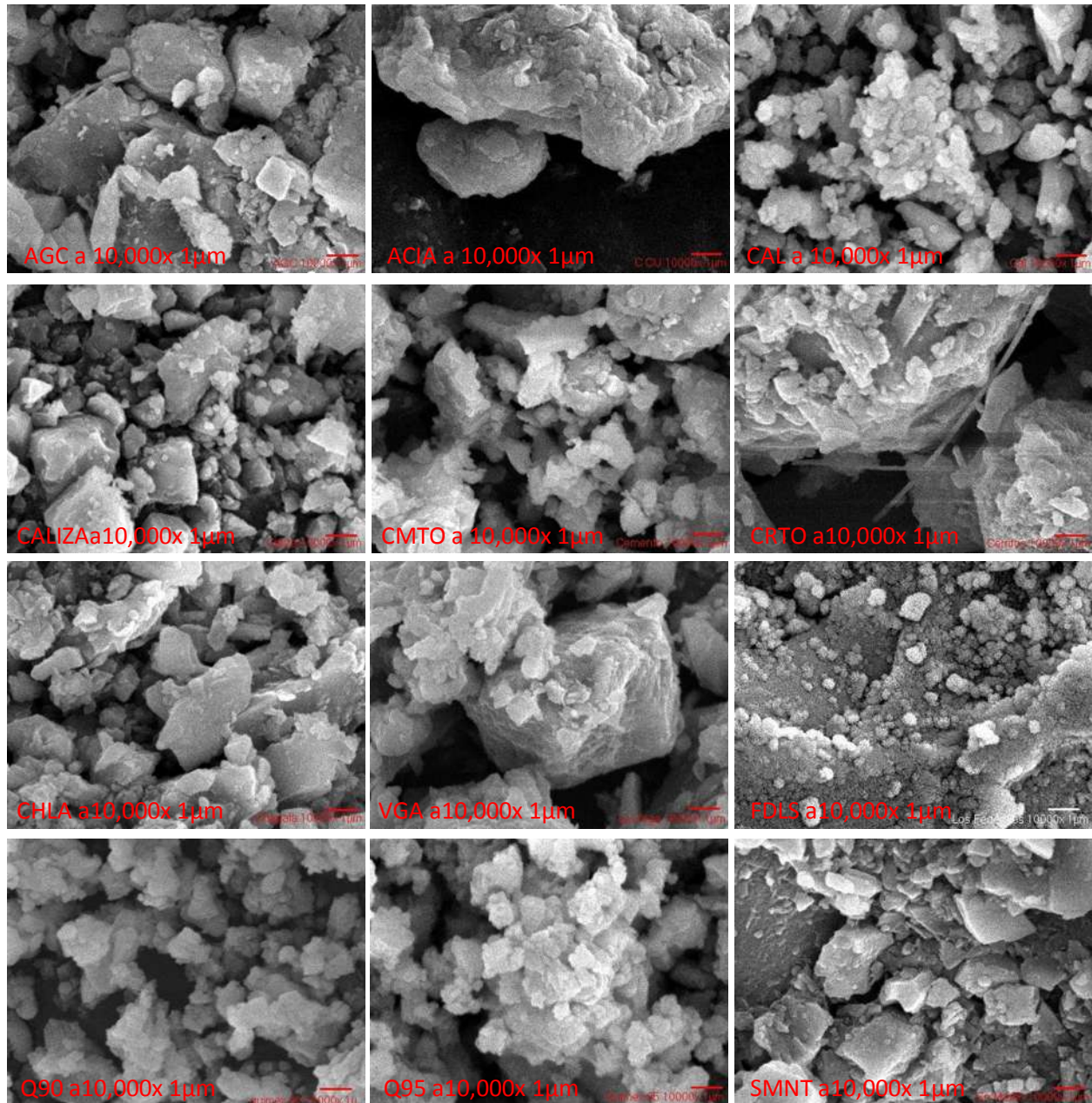


Fig. IV.9 Fotografías de cada muestra de filler tomada a 10, 000 aumentos.



En las fotografías anteriores, se manejó una clave para cada muestra de filler, esto porque no era posible escribir el nombre completo de la muestra a la que corresponde, la clave utilizada se define en el cuadro V.3 siguiente:

Tabla IV.3 Polvos minerales o filler correspondientes a las claves utilizadas para el ensayo.

CLAVE	NOMBRE DEL POLVO MINERAL O FILLER	CLAVE	NOMBRE DEL POLVO MINERAL O FILLER
AGC	Banco de materiales AGC	CHLA	Banco de materiales Chapala
ACIA	Arcilla de las canchas de CU	VGA	Banco de materiales Chapala
CAL	Cal hidratada común	FDLS	Banco de materiales Los Federales
CALIZA	Polvo de piedra Caliza	Q90	Quimex 90
CMTO	Cemento Portland	Q95	Quimex 95
CRTO	Banco de materiales Cerritos	SMNT	Banco de materiales San Martin

Como resultado de este ensayo, se pone en evidencia la morfología de los diferentes tipos de filler, lo que comprueba que no es suficiente que posean una distribución granulométrica aproximada, pues las características morfológicas de las partículas son diferentes, y en consecuencia el área superficial específica de estos agregados es diferente, lo que implica que un cálculo indirecto a partir de los tamaños granulométricos de esta fracción fina no es adecuado.

Mediante estas fotografías, fue posible corroborar que las partículas de arcilla se encuentran agrupadas, razón por la cual presento una distribución granulométrica de tamaños que oscilan entre los 0.040 y 0.075 mm de diámetro.



La imagen de la arcilla agrupada en pequeños grumos, puede ser el indicio del porque una mezcla asfáltica tiende a deteriorarse rápidamente durante las primeras temporadas de lluvia, pues estas partículas de arcillas agrupadas pueden repercutir en la delgada película de asfalto que cubre los agregados, facilitando el desprendimiento de la misma y trayendo como consecuencia la disgregación de las partículas pétreas que conforman la carpeta asfáltica, propiciando de este modo la formación de baches y un rápido deterioro de la estructura de pavimento por la filtración del agua al resto de las capas granulares.

IV.2.3 Difracción de Rayos X (DRX).

El resultado del análisis de este ensayo consistió en un espectro gráfico de la muestra, en la que se describían los minerales que la integraban. Debido a que se generó un espectro de difracción por cada muestra y por los objetivos de este capítulo, se presenta a manera de resumen la tabla que contiene los diferentes minerales identificados para cada una de las muestras de filler, (tabla IV.4). Los espectros de difracción de cada una de las muestras, se encuentran reportados en los anexos de esta investigación.

Tabla IV.4 Minerales identificados en los polvos minerales o filler.

POLVO MINERAL O FILLER	FASES MINERALES IDENTIFICADAS
Banco de materiales AGC	- Ortoclasa (21.48%) - Montmorillonita (10.96%) - Albita cálcica (84.4%)
Cal hidratada común	- Calcita (85.02%) - Hidróxido de calcio (90.09%)
Polvo de piedra caliza	- Calcita (63.59%)
Arcilla de las canchas de CU	- Cuarzo (115.33%) - Anortita sódica (100.00%) - Tridimita (20.69%)
Cemento portland ordinario	- Calcita (71.20%) - Silicato de calcio oxido (54.20%) - Albita (20.3%)



Banco de materiales Cerritos	- Anortita sódica (90.85%)
Banco de materiales Chapala	- Cristobalita (99.73%) - Albita calcica (79.56%) - Cuarzo (43.34%) - Tridimita (38.43%)
Banco de materiales La Vega	- Anortita sódica (96.26%)
Banco de materiales Los Federales	- Sin mineral identificado, la muestra resulto ser amorfa.
Quimex 90	- Portlandita (98.32%) - Calcita (25.65%)
Quimex 95	- Portlandita (98.47%) - Calcita (71.59%)
Banco de materiales San Martin	- Albita calcica (77.69%)

En la tabla anterior además de los minerales identificados se incluye el porcentaje con que estos se encuentran presentes en cada polvo mineral. Por los valores mostrados, nos podemos dar cuenta de que en la mayoría de las muestras tenemos minerales de albita y calcita, pero están presentes en cada polvo mineral con diferentes grados de concentración o pureza.

Los tipos de minerales y su porcentaje en las muestras de polvo mineral, son un claro indicativo que puede justificar el porqué de los valores obtenidos en el ensayo de azul de metileno, pues como observamos, las muestras que contienen un alto contenido de minerales de cuarzo, albita, anortita y montmorillonita, son las mismas que presentamos un valor mas alto de azul de metileno.



IV.3 Estudio de la influencia del tipo de filler ante el efecto térmico, la humedad y el envejecimiento del mástico mediante el método UCL®.

Con los resultados obtenidos y a manera de resumen se muestran solo las gráficas correspondientes a las curvas de estado para cada una de las tres evaluaciones que se realizaron. Los reportes de cada prueba se encuentran en el apartado de anexos.

IV.3.1 Evaluación de la susceptibilidad térmica.

La gráfica correspondiente a los resultados obtenidos por esta evaluación, se presenta en la figura IV.10 siguiente.

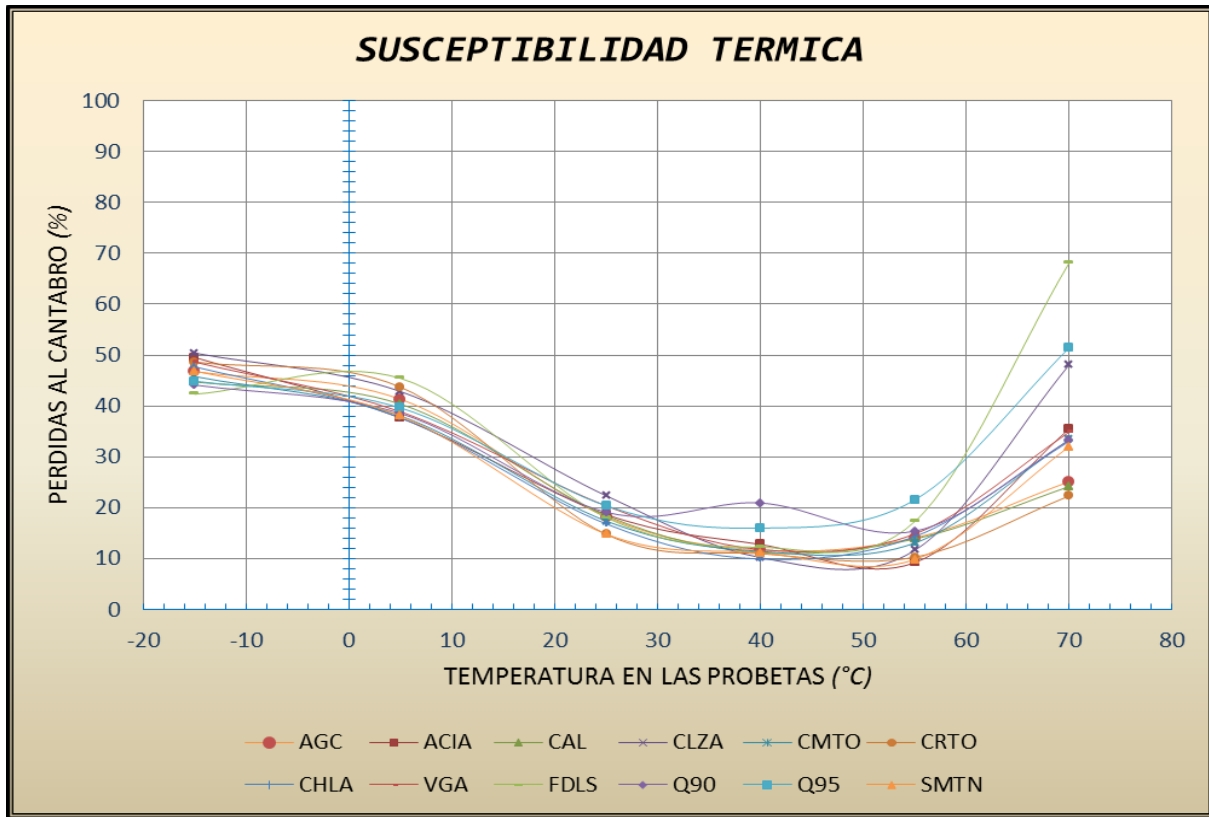


Fig. IV.10 Curvas de estado para la evaluación de la susceptibilidad térmica.



Como se puede observar de la gráfica presentada, la influencia del tipo de filler no influye significativamente en la reducción de las pérdidas al cántabro para una temperatura inferior a los 40 °C, sin embargo a partir de ésta se comienza a marcar más el efecto que genera.

En esta evaluación, el filler del banco de materiales de cerrito resulto generar la menor cantidad de perdidas, a pesar de tener un pH relativamente bajo en comparación con las otras muestras de filler, pero posible que este comportamiento pueda ser originado por que la mayor parte del tamaño de sus partículas se concentra entre los 0.040 mm y los 0.075 mm.

Es importante notar, que para esta evaluación térmica, las probetas elaboradas con el polvo mineral de arcilla, no presentan una comportamiento mecánico inferior al resto de las probetas elaborados con los otros polvos minerales, lo que implica que puede desempeñarse adecuadamente mientras no exista la presencia de agua, condición que no se da en el ambiente natural.

IV.3.2 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad.

Los resultados obtenidos del proceso de ensayo de las probetas tipo Marshall de cada una de las muestras de filler, se encuentran graficadas en la figura IV.11 siguiente, en la que es posible observar y comparar las pérdidas al cántabro de cada una de las probetas elaboradas con cada uno de los polvos minerales analizados.

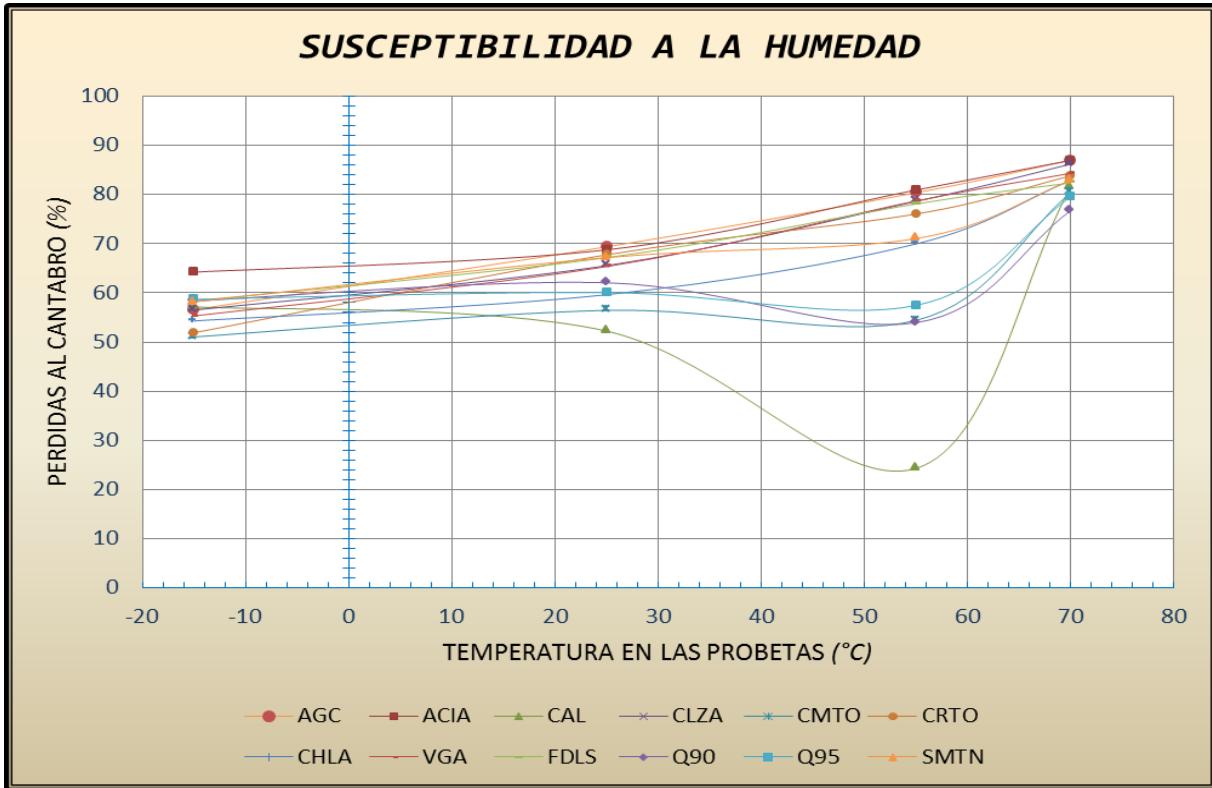


Fig. IV.11 Curvas de estado para la evaluación de la susceptibilidad a la humedad.

Mediante esta grafica se observa que el porcentaje de pérdidas al cántabro en comparación con las generadas por la susceptibilidad térmica es mayor, lo que implica que el efecto del agua genera un efecto desfavorable en el comportamiento de toda mezcla asfáltica.

Mediante este ensayo, es claramente notable que las probetas tipo Marshall elaboradas con el polvo mineral de arcilla, presentan un porcentaje de perdidas muy similar con respecto al resto y no uno completamente desfavorable como se esperaba. Esto puede ser debido a que las partículas de arcilla fueron perfectamente cubiertas e impermeabilizadas por el asfalto, sin embargo es probable que mediante una metodología como la Rueda Cargada de Hamburgo, pueda observarse el daño que genera tener un material contaminado por arcilla.

Una vez más se ve que el efecto del filler no influye considerablemente en las pérdidas que se generan por debajo de los 40 °C, sin embargo, cuando esta temperatura se ve rebasada, son los polvos minerales de origen industrial presentan una reducción significativa en las perdidas.

IV.3.3 Evaluación de la susceptibilidad al envejecimiento.

La grafica correspondiente a los resultados obtenidos por esta evaluación, se presenta en la figura IV.12 siguiente.

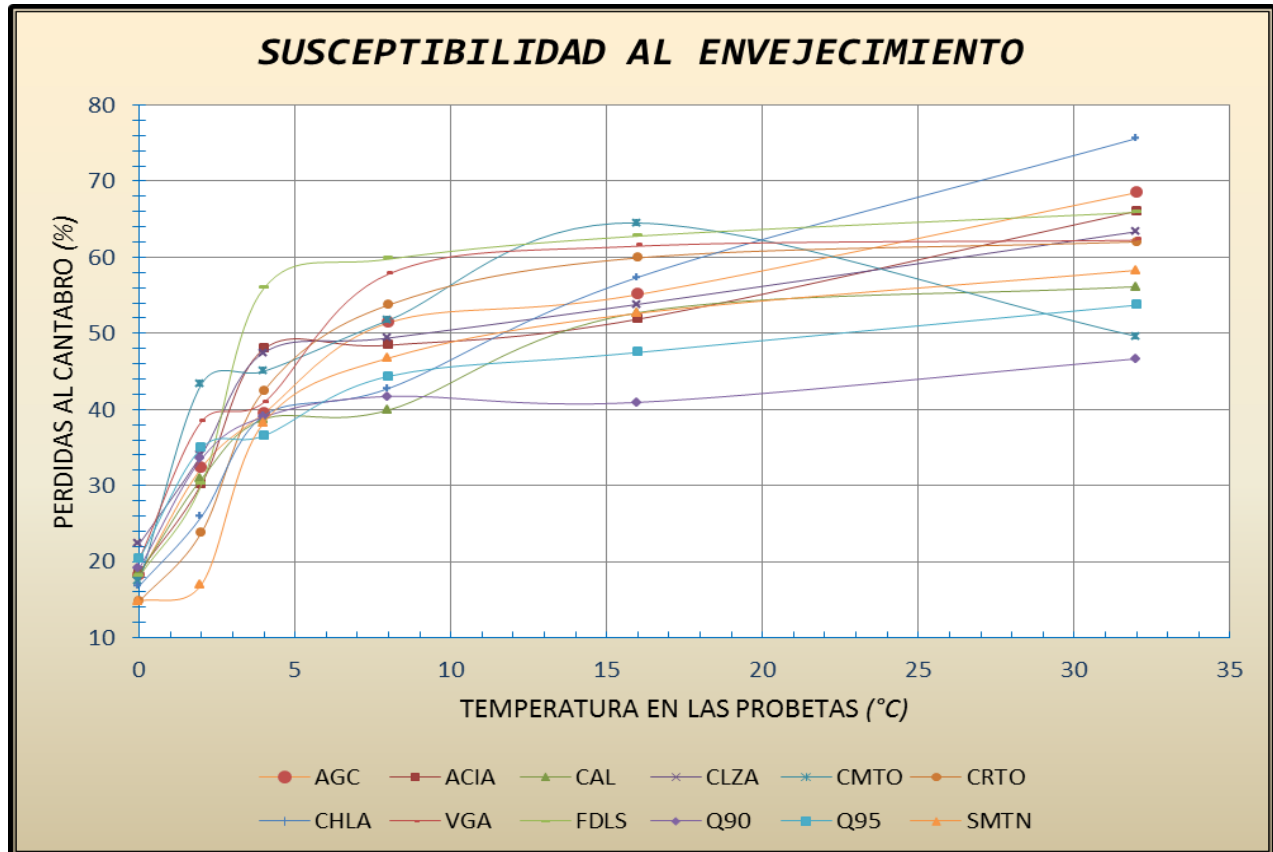


Fig. IV.12 Curvas de estado para la evaluación de la susceptibilidad al envejecimiento.

Con los resultados obtenidos por esta prueba, la diferencia en el efecto causado por cada tipo de filler se ve claramente diferenciada, las tendencias en las pérdidas producidas por cada filler presentan una diferencia distinta a las obtenidas mediante el efecto térmico y de humedad, ya que mediante éste ensayo, se observa que a medida que se incrementa el tiempo de envejecimiento del asfalto, el porcentaje en pérdidas lo hace de manera proporcional.



Se observa que para éste ensayo, los polvos minerales de origen industrial presentaron un adecuado desempeño, pues el porcentaje de pérdidas se encuentra por debajo de los obtenidos mediante los polvos minerales de recuperación.

Se observa también, que el polvo mineral de arcilla se comportó de forma adecuada, generando porcentajes de pérdida muy semejantes a los obtenidos mediante Hidróxido de Calcio Quimex 95 (Q95), lo cual puede ser un indicativo de que lo que contribuye a reducir el porcentaje de pérdidas mediante el incremento de la cohesión es la finura del polvo mineral, sin embargo es importante notar que en este ensayo estuvo ausente de la presencia del agua, lo que implica que la arcilla no puede ser un material adecuado para obtener carpetas asfálticas durables y resistentes mecánicamente.

Es recomendable que para futuras investigaciones, se considere emplear polvos minerales de granulometrías muy finas, y se realice un ensayo de mezclas asfálticas formadas con estos polvos minerales para condiciones de humedad.



IV.4 Estudio del efecto del tipo de filler en las propiedades reológicas del mástico mediante el reómetro de corte dinámico.

La calidad de las mezclas asfálticas para pavimentación se puede resumir en tres propiedades principales que son: Resistencia ante la deformación, flexibilidad y durabilidad, en las que, como se mencionó en el capítulo 2, el filler tiene una influencia importante, ya que su inclusión permite:

- **Mejorar el cerrado de la mezcla sin el empleo exagerado de asfalto.** Esto debido a que el filler actúa como rellenedor de vacíos, lo cual permite disminuir espacios libres existentes entre agregados mayores. Esta actividad además depende de los vacíos de la mezcla, ya que cuando el agregado está bien graduado y la forma de sus partículas, permiten una ajustada distribución, entonces la necesidad de agregar filler es menor, incluso puede llegar a ser inconveniente por disminuir exageradamente espacios libres que deben ser ocupados parcialmente por asfalto y en consecuencia se obtendrían mezclas pobres en ligante de menor durabilidad.
- **Incrementar la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica.** Esto debido a que el filler aumenta de manera importante la viscosidad del asfalto, mejor dicho la combinación filler-asfalto o “mástico” es un sistema de alta viscosidad el cual participa de manera importante en la resistencia ante la deformación.
- **Incrementar la durabilidad de la mezcla.** Esto debido a que el filler actúa como rellenedor de vacíos, lo cual permite disminuir la porosidad dificultando la entrada de agentes agresivos como agua y aire; Además de que es el principal aglomerante dentro de la mezcla asfáltica ya que mantiene unidos a los agregados gruesos.



Los resultados obtenidos mediante los análisis desarrollados para esta etapa de estudio, consisten en una serie de tablas y graficas que el software integrado con el equipo proporcionan una vez concluidos los ensayos, sin embargo y para este capítulo solo se presentaran las gráficas obtenidas por dicha evaluación, el reporte generado se presenta en el apartado de anexos.

Con el propósito de clasificar a los diferentes tipos de filler empleados en este estudio de acuerdo a su distribución de tamaños de partícula fina obtenido mediante dicho análisis de partícula fina, se emplea el concepto de percentil, particularmente percentil 50 y el diámetro de partícula, esto quiere decir que si 12,00 μm es el percentil 50 el 50% de las partículas tienen un diámetro igual o menor a 12,00 μm y lógicamente el otro 50% mayores.

Basados en el concepto de diámetro de partícula y percentil 50 los doce diferentes tipos de filler empleados en el presente análisis, es posible clasificarlos de la manera en que se muestra en la siguiente tabla IV.5.

Tabla IV.5 Clasificación de los diferentes tipos de filler empleados en el presente estudio en función del tamaño de partícula fina en el percentil 50.

MÁS FINAS	POLVO MINERAL O FILLER	PERCENTIL 50(μm)
1	Quimex 90	5, 683
2	Cal comercial	5, 934
3	Quimex 95	7, 334
4	Cemento portland	12, 460
5	Agregado de polvo calizo	13, 020



6	Banco Chapala	17, 880
7	Banco San Martin	29, 000
8	Banco La Vega	30, 900
9	Banco AGC	32, 520
10	Banco Los Federales	38, 240
11	Arcilla de las canchas de CU	44, 020
12	Banco Cerritos	47, 330

Enseguida se presentan los resultados de las pruebas oscilatorias, se muestran los resultados para la resistencia ante la deformación G^* , Viscosidad Compleja η^* . Estas pruebas se llevaron a cabo con una frecuencia de 10 rad/s, controlando por deformación a 10%, a las temperaturas de 52, 58, 64, 70, 76 y 82 °C.

IV.4.1 Evaluación del módulo complejo (G^*)

En la siguiente gráfica se muestra la curva de módulo complejo contra temperatura obtenida por cada tipo de filler, así como el presentado por el asfalto convencional AC-20 que se empleó para la fabricación del mástico en esta etapa de estudio y en la del ensayo mediante el método UCL®.

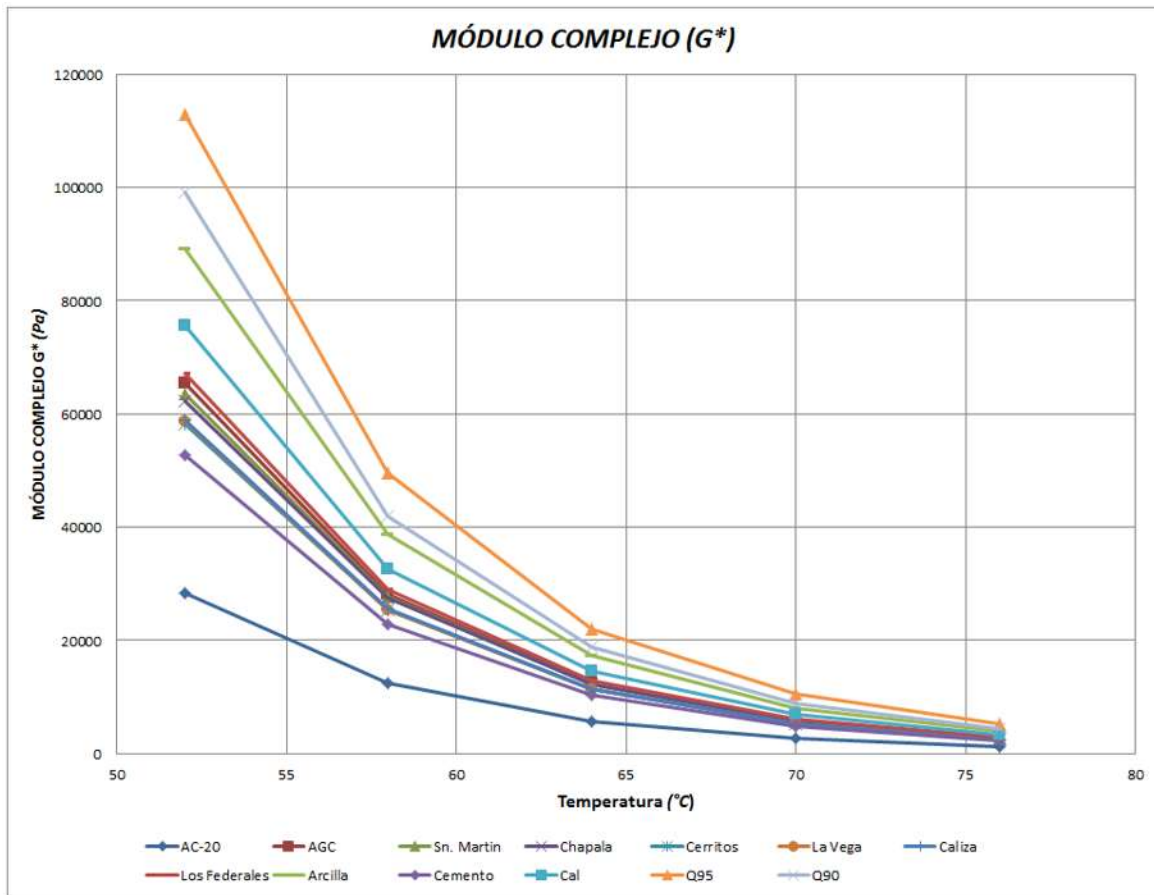


Fig. IV.13 Curvas de Modulo complejo vs temperatura.

Con los resultados de esta prueba, se puede observar que los “másticos” fabricados con los distintos tipos filler presentan comportamientos diferentes y se observa una cierta tendencia a agruparse por los tamaños de partícula, que es lo que se ve ocurre con los polvos minerales de tipo industrial, los cuales presentan una mayor cantidad de partículas finas, situación muy similar a la analizada en el método UCL®.

Los filler que son de fuentes minerales (bancos de materiales AGC, La Vega, San Martín, Los Federales y Chapala), presentan un comportamiento que se podría considerar como una clasificación particular en la que estos tipos de filler caen dentro de un rango determinado.



También se observa que el Cemento Portland (filler de origen Industrial), presenta la resistencia más baja, pese a que es un mineral que tiene una de las granulometrías más finas; así mismo, la Arcilla de las canchas de CU, está presentando una resistencia muy alta, pese a que como se menciona en el apartado de análisis de granulometría fina, el valor de tamaño de partícula obtenida mediante dicho análisis, no es representativo de las características de este agregado, y se observa claramente que éste tiende a incrementar la resistencia, lo cual puede ser producto de la finura que este mineral tiene.

IV.4.2 Evaluación de la viscosidad compleja (η^*)

Analizado para las mismas condiciones que el módulo complejo, se obtienen una serie de valores que se pueden graficar, y obtener como resultado las curvas que se muestran en la siguiente gráfica, las cuales corresponden a las diferentes temperaturas de análisis, (fig. IV.14).

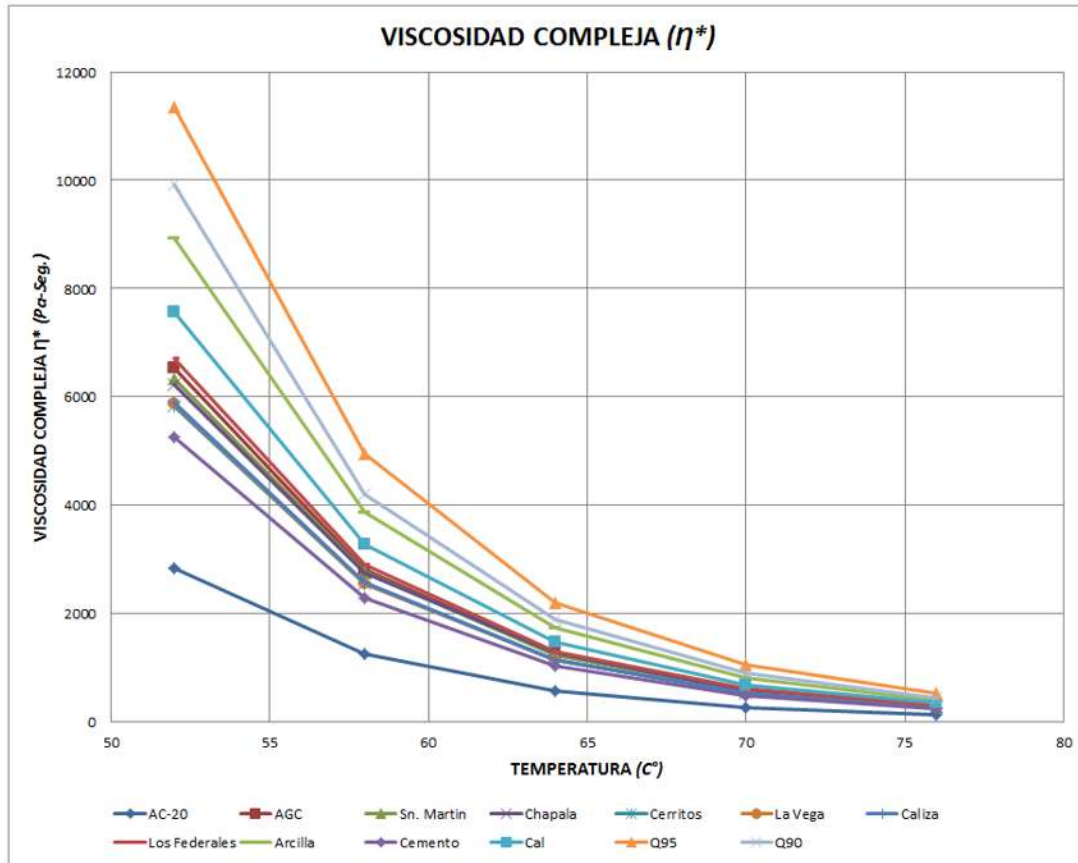


Fig. IV.14 Curvas de viscosidad compleja vs temperatura.

Con la gráfica anterior, se observa de nueva cuenta que los polvos minerales o filler de origen industrial tienden a agruparse, además de que continúan siendo los que mayor resistencia presentan, sin embargo, es posible observar que el comportamiento de la arcilla de las canchas de CU, tiende a asemejarse al resultado obtenido mediante éstos polvos minerales.

Una posible explicación del por que es que ocurre esta tendencia, sea el debido al tamaño de las partículas finas, ya que es bien conocido por todos, que la arcilla tiene tamaños de partículas muy finos, ya que ha quedado demostrado mediante los resultados en este ensayo y los obtenidos por el método UCL®, que los filler con granulometría más fina presentan las resistencias más altas en comparación con los materiales que tienen una granulometría más gruesa.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través de los diferentes resultados obtenidos en cada una de las pruebas desarrolladas en la presente investigación para las doce muestras de polvo mineral, es posible contar con un panorama amplio que permite comprender que el filler que se adiciona o que está presente en los agregados pétreos como material de recuperación, merece especial importancia tanto por su calidad como por el porcentaje en contenido dentro de la mezcla, ya que como se demostró mediante las pruebas realizadas en la presente investigación, el tipo y característica físico-químicas del filler, repercute en el desempeño mecánico de la mezcla.



Se demostró mediante los ensayos de plasticidad y azul de metileno, que la prueba de equivalente de arena no es suficiente como parámetro de control de calidad de los agregados pétreos que se pretende emplear en las mezclas asfálticas densas, razón por la cual se considera que las mezclas asfálticas que son elaboradas con agregados pétreos que están contaminados con minerales arcillosos, tienden a deteriorarse significativamente ante la presencia de agua, siendo muy notorio durante la época de lluvias. Por la razón anterior, se recomienda utilizar el ensayo de azul de metileno como parámetro de control de calidad para el control de contenido de material arcilloso que pudiera estar presente dentro de los agregados pétreos, a fin de garantizar que las mezclas asfálticas que se elaboren sean más resistentes a los efectos de humedad.

Se observó que el análisis de tamaño de partícula fina realizado mediante vía seca, no es aconsejable debido a que por la naturaleza física de los polvos minerales, estos pueden agruparse y observarse como partículas de tamaños mayores, como ocurrió en la presente investigación con la arcilla. Por esta razón, se recomienda a futuras investigaciones tener especial cuidado con dicho análisis y de ser posible realizar el mismo mediante una vía húmeda, a fin de lograr separar todas las partículas minerales.

A pesar de haber sido un ensayo que describe características cualitativas de los polvos minerales, el análisis de microscopía electrónica de barrido (*MEB*) fue de gran utilidad para identificar la agrupación de las partículas de arcillas, y justificar el porqué se obtenía una curva granulométrica para este filler en la que la mayoría de sus partículas tendían a presentar tamaños entre los 0.040 y 0.075 mm. Se recomienda para futuras investigaciones continuar realizando este ensayo.

El análisis de difracción de rayos X, permitió identificar y cuantificar el contenido de los minerales dentro de cada una de las muestra de polvo mineral, sin embargo y debido a la complejidad y posibles riesgos que implica realizar esta prueba, no se considera necesaria



para el control de calidad de los agregados pétreos, pues fue posible identificar que los valores de azul de metileno más altos obtenidos para las muestras de filler obedecían a aquellos que presentaban altos contenidos de minerales que tienden a ser solubles en agua o a expandirse ante la presencia de esta, razón por la cual se considera más sencillo y económico el empleo de la metodología de azul de metileno.

Fue posible observar que la interacción de la mezcla filler-asfalto es importante, ya que mediante los resultados del ensayo UCL para las variantes térmica, de humedad y de envejecimiento del asfalto, se observó que a medida que los polvos minerales poseen mayor cantidad de partículas finas, se reducen los porcentajes de pérdidas al cántabro, lo que implica que se obtiene una mezcla asfáltica en la que la película de asfalto que envuelve a los agregados pétreos es lo suficientemente gruesa para soportar el efecto de oxidación y proporcionar la una adecuada adherencia y cohesión a la estructura mineral para resistir los esfuerzos de impacto y abrasión.

Los ensayos reológicos, demostraron que existen comportamientos diferentes entre cada uno de ellos, pero se observa una tendencia al agruparse los resultados obtenidos mediante los polvos minerales de tipo industrial, los cuales presentan una mayor cantidad de partículas finas, situación muy similar a la que ocurrió con el método UCL®.

En este ensayo, y al igual que lo observado en los resultados del método UCL®, la arcilla presenta un comportamiento semejante al obtenido con los polvos minerales de origen industrial, por lo que se propone para futuras líneas de investigación, considerar ensayos que impliquen el efecto de la humedad, pues con los ensayos desarrollados en esta investigación, no fue posible evaluar adecuadamente esta condición.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alejandro Padilla Rodríguez, *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Catalunya, 2004.
2. Andrés Guillermo Flores Alcantar, *Historia de los caminos en México: Rutas y Caminos en el México Prehispánico*. Tesis de licenciatura del Instituto Tecnológico de Tepic, Nayarit, México. 2004.
3. Anuario Estadístico de la SCT 2008.
4. Carlos Barciela López, Albert Carreras, Xavier Tafunell, *Estadísticas históricas de España: siglos XIX-XX*, Volumen 1. Editorial fundación BBVA. 2005.
5. Francisco Rama Labrador, *Historia de los pavimentos urbanos*. Revista colegio de ingenieros técnicos de obras públicas No. 371, Madrid, España. Febrero de 2007.
6. Israel Sandoval Navarro, Ignacio Cremades Ibáñez, Ignacio Javier Ramírez Muños, Juan Miguel Alvarado Guzmán, *Estudio del comportamiento reológico del mástico mediante el reómetro de corte dinámico*, Artículo Técnico de la empresa SURFAX SA de CV presentado en el VII Congreso Mexicano del Asfalto, AMAAC 2011.
7. Luis Bañón Blázquez, Jose F. Beviá García, *Manual de Carreteras, Tomo 1. España*, 2000.
8. Luis Ricardo Vásquez Varela, *Breve reseña sobre el diseño de pavimentos*. Documento técnico de la Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Enero de 2010.



9. Manual de la SCT, M.MMP.1.07/07 *Límites de Consistencia*.
10. Manual de la SCT, M.MMP.4.04.002/02 *Granulometría de materiales pétreos para mezclas asfálticas*.
11. Manual de la SCT, M.MMP.4.04.004/02 *Equivalente de arena de materiales pétreos para mezclas asfálticas*.
12. Manual de la SCT, M.MMP.4.04.014/09, *Azul de Metileno de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*.
13. Manual de la SCT, M.MMP.4.05.025/02, *Módulo Reológico de Corte Dinámico*.
14. Norma de la SCT, N.CMT.4.04/08 *Materiales pétreos para mezclas asfálticas*.
15. OCDE. *Estudio sobre Seguridad en las Carreteras*. Safety on Roads. What's the vision OECD Publishing.
16. OCDE. *Estudios económicos: México 2007*. Capítulo 4: Mejoras a la infraestructura en México. OECD Economic Surveys México – Volumen 2007.
17. OCDE. *Estudios Territoriales: México. 2006*. Capítulo 3: Estrategias y Políticas para el Desarrollo Territorial. OECD Territorial Reviews Mexico – Volumen 2006.
18. Octavio Coronado García, María Fernanda Mena Castellanos, Didier Ferley Micán Bacca, Diego Alfonso García Puerto, *Correlación de Resultados Entre el Ensayo Equivalente de Arena y Azul de Metileno (Método de la Mancha) en Materiales Granulares*. Revista Épsilon, Enero – Junio, Numero 008, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Pag. 35 -43.
19. Olegario Llamazares Gómez, *Evolución de la técnica de carreteras*. Revista de obras públicas No. 3057, España. Enero de 1970.
20. Oscar Javier Reyes Ortiz, Juan Ricardo Troncoso Rivera, Javier Fernando Camacho Tauta, *Comportamiento Mecánico y Dinámico de una Mezcla Asfáltica con Adición de Cenizas Volantes*. Tesis doctoral de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. 21 de Marzo de 2006.



21. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*, ASPHALT INSTITUTE, Serie de manuales No.22 (MS-22), 1982.
22. SUPERPAVE, *Antecedentes del diseño y análisis de las mezclas asfálticas del SUPERPAVE*. ASPHALT INSTITUTE, Noviembre 1994.
23. V. Zorio Blanco, *Breve historia de las carreteras*. Revista de obras públicas No. 3254, España. Enero de 1987.
24. *Visión Sectorial de Infraestructura Carretera 2007-2012*, SCT, 2007.