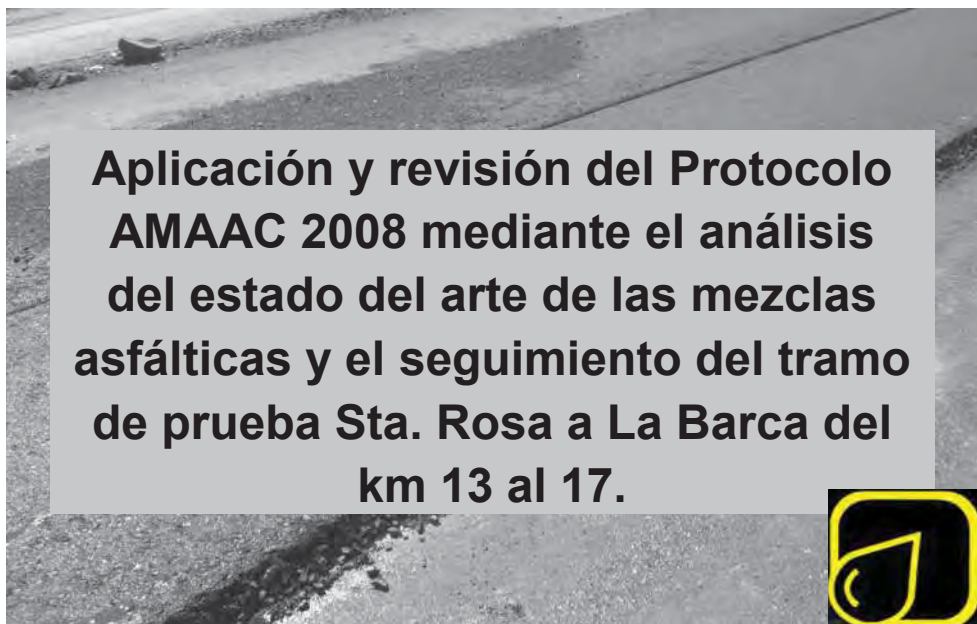




**Universidad Michoacana de
San Nicolás de Hidalgo.**



Facultad de Ingeniería Civil



**Aplicación y revisión del Protocolo
AMAAC 2008 mediante el análisis
del estado del arte de las mezclas
asfálticas y el seguimiento del tramo
de prueba Sta. Rosa a La Barca del
km 13 al 17.**

Tesis que presenta

Ing. Manuel Tinoco Zamudio

**Para obtener el grado de Maestro en Infraestructura del
Transporte en la rama de las Vías Terrestres.**

Asesor: Dr. Jorge Alarcón Ibarra.

Febrero de 2011



**Universidad Michoacana de
San Nicolás de Hidalgo.
(UMSNH)**

Facultad de Ingeniería Civil



**Aplicación y revisión del Protocolo AMAAC 2008
mediante el análisis del estado del arte de las
mezclas asfálticas y el seguimiento del tramo Sta.
Rosa a La Barca del km 13 al 17.**

Tesis que presenta

Ing. Manuel Tinoco Zamudio

**Maestría en Infraestructura del Transporte en la rama de las Vías
Terrestres.**

Asesor: Dr. Jorge Alarcón Ibarra

Febrero de 2011

Contenido

1	Introducción.....	16
1.1	Objetivo.....	19
1.1.1	Objetivos Particulares.....	20
1.2	Planteamiento del problema.....	20
1.2.1	Alcances.....	20
1.2.2	Objeto de estudio.....	21
1.2.3	Problemas particulares a resolver.....	23
1.3	Justificación.....	25
1.3.1	Importancia del producto del trabajo propuesto.....	25
1.3.2	Probabilidades de éxito.....	31
2	Antecedentes.....	32
2.1	Método de diseño Marshall.....	32
2.2	Método SUPERPAVE.....	35
2.3	Protocolo AMAAC 2008.....	37
3	Hipótesis de trabajo.....	40
4	Estado del arte de las mezclas asfálticas en México.....	41
4.1	Orígenes del cemento asfáltico.....	41
4.1.1	Antecedentes generales.....	41
4.1.2	Definición y composición del cemento asfáltico.....	47
4.1.3	Producción y distribución del asfalto en México.....	51
4.1.4	Cementos asfálticos clasificados por penetración.....	60
4.1.5	Cementos Asfálticos clasificados por viscosidad.....	63
4.1.6	Cementos asfálticos clasificados por grado de desempeño (ligantes asfálticos con metodología SHRP). (Fuente: SHRP (SUPERPAVE), Rafael Limón 1998).....	64
	➤ Concepto de las especificaciones para cementos asfálticos de SHRP.....	66
	➤ Diferencia entre temperatura del pavimento y temperatura del aire.....	66
	➤ Reología.....	67
	➤ Ensayes seleccionados por SHRP para cementos asfálticos.....	70

➤ Especificaciones para asfaltos clasificados según su grado de desempeño (PG) con metodología SHRP.....	73
4.1.7 Aditivos modificadores del Cemento Asfáltico	77
4.2 Orígenes de las mezclas asfálticas y su evolución	78
4.2.1 Historia de las mezclas asfálticas y su empleo en las carreteras mexicanas.....	79
4.2.2 Estado actual de las mezclas asfálticas.	94
4.2.3 Materiales pétreos para mezclas asfálticas.	95
➤ Peso específico.....	96
➤ Granulometría	96
➤ Límites de Atterberg y pruebas complementarias.....	100
➤ Afinidad entre el material pétreo y el asfalto.	100
➤ Resistencia a la abrasión.....	102
➤ Resistencia al Intemperismo.....	103
➤ Forma de las partículas.....	103
4.2.4 Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa.....	104
➤ Método Marshall	105
➤ Método de Hveem.....	110
5 Protocolo AMAAC	116
5.1 Introducción (Fuente: Dr. Paul Garnica, AMAAC).....	116
6 Seguimiento del tramo de prueba para el <i>Protocolo AMAAC</i> , diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño, del km 13+000 al 17+000 de la carretera Sta. Rosa – La Barca en el estado de Jalisco.....	122
6.1 Características generales del proyecto	122
6.2 Diseño de la mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño con el Protocolo AMAAC.....	126
6.2.1 Selección de agregados pétreos	127
➤ Calidad de agregado grueso.....	128
➤ Calidad de agregado pasa malla #4	129
➤ Granulometría	129
6.2.2 Selección del cemento asfáltico.....	132
6.2.3 Diseño Volumétrico.....	133

6.2.4	Susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad.	136
6.2.5	Susceptibilidad a la deformación permanente y al daño inducido por humedad.....	138
➤	Rueda Cargada de Hamburgo.....	138
6.2.6	Módulo dinámico.....	139
6.2.7	Resumen del diseño de la mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño.	140
6.3	Reporte general del seguimiento en obra.	141
6.3.1	Reconocimiento del sitio.....	141
6.3.2	Materiales.....	145
➤	Pétreo.....	145
➤	Asfalto.....	146
6.3.3	Planta de mezclado.....	146
➤	Tolvas para suministro de material pétreo.	148
➤	Carro tanque.....	149
➤	Tambor secador y mezclador.....	150
➤	Banda transportadora.....	152
➤	Control de calidad en la planta de mezclado.	154
6.3.4	Riegos de liga.....	156
6.3.5	Tendido y compactado.....	158
6.4	Seguimiento de resultados de laboratorio.....	163
6.4.1	Calidad de la mezcla asfáltica.....	164
➤	Temperaturas de mezclado y tendido.....	166
➤	% De vacíos de aire.....	167
➤	Contenido de asfalto.....	168
➤	Calidad del asfalto.	169
➤	Granulometrías.....	170
➤	Deformación.....	189
6.4.2	Obtención de núcleos de la mezcla asfáltica tendida y compactada.	193
➤	Espesores.....	194

➤	% de compactación.....	197
7	Conclusiones	198
8	Bibliografía.....	200
9	Anexos.....	203
A.	Especificaciones de proyecto.....	203
➤	Base hidráulica.	203
➤	Recuperación del pavimento existente para mejoramiento de base hidráulica.	204
➤	Riego de Impregnación.....	204
➤	Riego de liga para base asfáltica.	205
➤	Base asfáltica.....	205
➤	Riego de liga para carpeta de concreto asfáltico.	206
➤	Carpeta de concreto asfáltico.	206
➤	Contenido.....	207
➤	Definición	207
➤	Requisitos de calidad de los materiales	207
➤	Cemento asfáltico.	209
➤	Diseño de la mezcla.....	209
➤	Límites Granulométricos Superpave para Tamaño Máximo Nominal 19 mm (3/4")......	210
➤	Construcción	213
➤	Aceptación de la mezcla.	216
➤	Medición.....	216

Índice de Figuras

Fig. 1.1: Estructura típica de un pavimento flexible.	22
Fig. 1.2: Tipos de Pavimentos; flexible a la derecha y rígido a la izquierda	22
Fig. 1.3: Problemas localizados en nuestros alrededores.	24
Fig. 1.4: Relación entre las diferentes áreas para cumplir con el objetivo en pavimentos.	25
Fig. 1.5: Distribución de la longitud de la red carretera según superficie de rodamiento en Kilómetros y porcentaje, año 2007.	26
Fig. 1.6: Distribución porcentual de la longitud de la red carretera según superficie de rodamiento. (Fuente SCT).....	26
Fig. 1.7: Estado Físico en % de carreteras pavimentadas, año 2007. (Elaboración propia con datos de SCT)	27
Fig. 1.8: Tránsito diario promedio anual en las autopistas de cuota. (Fuente SCT)	28
Fig. 1.9: Pasajeros por modo de transporte. (Fuente SCT).....	28
Fig. 1.10: Carga por modo de transporte. (Fuente SCT).....	29
Fig. 1.11: Representación de costos de operación = \$	30
Fig. 1.12: Mezcla asfáltica siempre en contacto con el usuario.	30
Fig. 2.1: Compactación Marshall	33
Fig. 2.2: Esquema representativo del compactador giratorio.	36
Fig. 2.3: Niveles de diseño para mezclas asfálticas.	39
Fig. 4.1: Productos y temperaturas típicas de destilación de crudo de petróleo. ..	50
Fig. 4.2: Proceso típico de destilación del petróleo.	51
Fig. 4.3: Hombres trabajando en el riego de un camino. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.	52
Fig. 4.4: Distribución de zonas para asfaltos según su clasificación por viscosidad (AC).....	64
Fig. 4.5: Distribución original de zonas para asfaltos según su clasificación por Grado de Desempeño (PG) propuesta por la SHRP con un 98% de seguridad. .	76
Fig. 4.6: Pruebas SUPERPAVE para propiedades físicas del asfalto	77
Fig. 4.7: Pavimento con bloques comprimidos de concreto asfáltico.	80
Fig. 4.8: Maquina cortadora de adoquines empleada en Europa para el año de 1900.	80
Fig. 4.9: John Loudon McAdam 1756-1836	81

Fig. 4.10: Primer pavimento americano de macadam en 1823, la pintura de Carl Rakeman indica el proceso constructivo que se empleó.....	82
Fig. 4.11: Trituradora Automóvil de 12 HP, utilizada principalmente en Europa aproximadamente para el año de 1920.....	83
Fig. 4.12: Aplanadora de 6 toneladas con motor Diesel, presentada en la exposición de maquinaria de Atlantic City en 1930.....	84
Fig. 4.13: Aplanadora Buffalo Springfield, presentada en la exposición de maquinaria de Atlantic City en 1930.....	84
Fig. 4.14: Mezcladora de revestimientos asfálticos de producción continua, utilizada principalmente en Europa aproximadamente para el año de 1920.....	85
Fig. 4.15: Motoconformadora tendiendo mezcla asfáltica, además equipada en su parte trasera con una especie de terminadora superficial utilizada en los años treinta. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.	87
Fig. 4.16: Planta mezcladora de asfalto de producción discontinua con capacidad de 1200 toneladas al día, que fue instalada en el arrollo del Encanto, Baja California aproximadamente en 1933. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.	88
Fig. 4.17: Maquina antecesora de la actual pavimentadora (Finisher) la cual fue empleada para revestir y terminar el pavimento asfáltico. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.	88
Fig. 4.18: Camino México – Cuernavaca; primera imagen 1925; segunda corresponde a la autopista en 1957. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.	92
Fig. 4.19: Riego de asfalto en la construcción de la autopista México - Cuernavaca. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.	93
Fig. 4.20: Zona de especificación granulométrica para materiales pétreos que se empleen en concretos asfálticos. Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1957.....	98
Fig. 4.21: Tamizado del material para obtener su granulometría.	99
Fig. 4.22: Graficas para determinar el contenido óptimo de asfalto por la metodología Marshall.	108
Fig. 4.23: Cohesiometro de Hveem.....	113
Fig. 4.24: Estabilómetro de Hveem.	114
Fig. 4.25: Dispositivo para medir la expansión de Hveem.....	115
Fig. 5.1: Evolución típica de la profundidad de rodera en un pavimento flexible. Comparación entre carpetas asfálticas convencional y de alto desempeño.	121
Fig. 6.1: Macrolocalización del tramo Sta. Rosa – La Barca.	123
Fig. 6.2: Microlocalización.	123

Fig. 6.3: Falla funcional por roderas presentada en el tramo.	124
Fig. 6.4: Falla estructural y funcional por deformación de carpeta y capas inferiores.....	124
Fig. 6.5: Falla estructural por fatiga presentada en el Tramo.	125
Fig. 6.6: Sección tipo.....	126
Fig. 6.7: Granulometría de diseño.....	131
Fig. 6.8: Zonas para definir el grado PG	132
Fig. 6.9: Esquema para la determinación de las gravedades específicas en el agregado pétreo.....	133
Fig. 6.10: Volúmenes presentes en una mezcla asfáltica.	134
Fig. 6.11: Prueba de tensión indirecta.....	137
Fig. 6.12: Rueda cargada de Hamburgo.	138
Fig. 6.13: Ensayo en rueda de Hamburgo.....	139
Fig. 6.14: Carro de AMMEX descargando PG 76-22.	143
Fig. 6.15: Banco GRAVASE; al fondo se observa el frente de extracción, a la derecha se observa la trituradora con sus respectivas bandas que clasifican el material según el tamaño.	144
Fig. 6.16: Fresado de pavimento existente inadecuado y puede provocar agrietamiento longitudinal en el pavimento nuevo a largo plazo por el fenómeno de reflexión de grietas.	144
Fig. 6.17: Espesor de 2ª capa de base asfáltica de 4.5cm en el km 14+320 lado derecho.	145
Fig. 6.18: Trabajos de calibración de la planta el día 24 de octubre de 2009	147
Fig. 6.19: Planta de mezcla asfáltica de producción continua y flujo paralelo, sin recuperador de polvos.....	148
Fig. 6.20: Tolvas de material pétreo en frío. Se observa que hay traslado de materiales entre las diferentes tolvas.	149
Fig. 6.21: Conglomerado de mezcla asfáltica fría detectado el día 27 de marzo de 2010 que se produce en el tambor mezclador por la falta de limpieza.....	151
Fig. 6.22: Terrón de mezcla asfáltica detectado el 27 de marzo de 2010 con aproximadamente 35cm de longitud.	152
Fig. 6.23: Banda transportadora con asfalto adherido y sin dispositivo de carga que provoca una clasificación del material.....	153
Fig. 6.24: Dispositivo de carga para evitar clasificación del material, implementado a partir del 4 de enero de 2010.	154
Fig. 6.25: Dispositivo de carga requerido para minimizar la clasificación del material, en plantas de producción continua.	154
Fig. 6.26: Revisión de la temperatura en mezcla densa (175°C)	155
Fig. 6.27: Control de calidad en mezcla densa con compactador Marshall.....	156
Fig. 6.28: Riego de liga no cumple con el cubrimiento uniforme.	157
Fig. 6.29: Corazones extraídos del tramo, se aprecia la falta de liga.	157

Fig. 6.30: Tendido y rastrillado de mezcla densa.	158
Fig. 6.31: Clasificación de material en el camión, la mitad material grueso y la otra mitad material fino.	159
Fig. 6.32: Material en la tolva receptora de la pavimentadora muy clasificado....	159
Fig. 6.33: Montículos de material de desperdicio son colocados por delante de la pavimentadora para ser tendidos.	160
Fig. 6.34: Textura del material clasificado al tender.	160
Fig. 6.35: Objetos tirados que no son retirados al tender.	161
Fig. 6.36: Equipo de compactación	162
Fig. 6.37: Equipo de barrido	162
Fig. 6.38: Esquema de las franjas de construcción.	163
Fig. 6.39: Temperatura de mezclado.	166
Fig. 6.40: Temperatura de compactación.	167
Fig. 6.41: Comparación entre % de vacíos de la mezcla elaborada y el % de vacíos de proyecto.	168
Fig. 6.42: Contenido de asfalto de la mezcla en planta comparada con el contenido de proyecto.	168
Fig. 6.43: Mezcla elaborada el día 13 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+700 franja 3.	170
Fig. 6.44: Mezcla elaborada el día 13 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+650 franja 4.	171
Fig. 6.45: Mezcla elaborada el día 14 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+900 franja 4.	171
Fig. 6.46: Mezcla elaborada el día 18 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+350 franja 6.	172
Fig. 6.47: Mezcla elaborada el día 18 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+900 franja 6.	172
Fig. 6.48: Mezcla elaborada el día 19 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+950 franja 2.	173
Fig. 6.49: Mezcla elaborada el día 19 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+050 franja 2.	173
Fig. 6.50: Mezcla elaborada el día 20 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+550 franja 1.	174
Fig. 6.51: Mezcla elaborada el día 19 de diciembre de 2009 y tendida en el km 14+200 franja 4.	174
Fig. 6.52: Mezcla elaborada el día 20 de diciembre de 2009 y tendida en el km 14+180 franja 6.	175
Fig. 6.53: Mezcla elaborada el día 21 de diciembre de 2009 y tendida en el km 15+250 franja 4.	175
Fig. 6.54: Mezcla elaborada el día 22 de diciembre de 2009 y tendida en el km 15+020 franja 6.	176

Fig. 6.55: Mezcla elaborada el día 23 de diciembre de 2009 y tendida en el km 15+280 franja 1.	176
Fig. 6.56: Mezcla elaborada el día 22 de enero de 2010 y tendida en el km 16+860 franja 4.	177
Fig. 6.57: Mezcla elaborada el día 22 de enero de 2010 y tendida en el km 16+380 franja 4.	177
Fig. 6.58: Mezcla elaborada el día 25 de enero de 2010 y tendida en el km 16+600 franja 5.	178
Fig. 6.59: Mezcla elaborada el día 29 de enero de 2010 y tendida en el km 16+850 franja 3.	178
Fig. 6.60: Mezcla elaborada el día 01 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+400 franja 3.	179
Fig. 6.61: Mezcla elaborada el día 04 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+480 franja 6.	179
Fig. 6.62: Mezcla elaborada el día 05 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+810 franja 6.	180
Fig. 6.63: Mezcla elaborada el día 11 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+700 franja 2.	180
Fig. 6.64: Mezcla elaborada el día 12 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+260 franja 2.	181
Fig. 6.65: Mezcla elaborada el día 12 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+860 franja 1.	181
Fig. 6.66: Mezcla elaborada el día 13 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+000 franja 3.	182
Fig. 6.67: Mezcla elaborada el día 24 de febrero de 2010 y tendida en el km 14+420 franja 4.	182
Fig. 6.68: Mezcla elaborada el día 25 de febrero de 2010 y tendida en el km 14+580 franja 5.	183
Fig. 6.69: Mezcla elaborada el día 26 de febrero de 2010 y tendida en el km 14+250 franja 3.	183
Fig. 6.70: Mezcla elaborada el día 27 de febrero de 2010 y tendida en el km 14+060 franja 2.	184
Fig. 6.71: Mezcla elaborada el día 01 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+180 franja 1.	184
Fig. 6.72: Mezcla elaborada el día 04 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+560 franja 1.	185
Fig. 6.73: Mezcla elaborada el día 08 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+720 franja 4.	185
Fig. 6.74: Mezcla elaborada el día 09 de marzo de 2010 y tendida en el km 15+850 franja 2.	186

Fig. 6.75: Mezcla elaborada el día 12 de marzo de 2010 y tendida en el km 15+500 franja 2.	186
Fig. 6.76: Mezcla elaborada el día 20 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+950 franja 4.	187
Fig. 6.77: Mezcla elaborada el día 22 de marzo de 2010 y tendida en el km 15+600 franja 2.	187
Fig. 6.78: Mezcla elaborada el día 23 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+760 franja 3.	188
Fig. 6.79: Mezcla elaborada el día 25 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+820 franja 2.	188
Fig. 6.80: Mezcla elaborada el día 27 de marzo de 2010 y tendida en el km 15+730 franja 1.	189
Fig. 6.81: Mezcla elaborada el día 23 de diciembre de 2009.	190
Fig. 6.82: Mezcla elaborada el día 25 de marzo de 2010.	190
Fig. 6.83: Mezcla elaborada el día 25 de marzo de 2010 sometida a APA.	192
Fig. 6.84: Deformaciones hasta de 1.8cm en las juntas longitudinales.	193
Fig. 6.85: Brigada trabajando en extracción de núcleos, permeabilidad y deformación.	194
Fig. 6.86: Núcleo de la estación 13+200 con espesor mezcla densa de 5.5cm y dos capas de base asfáltica.	195
Fig. 6.87: Espesores.	196

Índice de Tablas

Tabla 2.1: requisitos de calidad para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall.	34
Tabla 2.2: Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall.	35
Tabla 2.3: Especificaciones de uso del compactador giratorio.....	36
Tabla 2.4: Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2 ton y/o el tipo de proyecto.	38
Tabla 4.1: Requisitos de calidad para el Asfalto 15-200. Fuente: Especificaciones de Caminos, Dirección Nacional de Caminos de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1947.	61
Tabla 4.2: Requisitos de calidad para los tipos de Cementos Asfálticos que se producían en México para el año de 1957. Fuente: Especificaciones Generales de Construcción, Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1957.....	61
Tabla 4.3: Requisitos de calidad SCT para los tipos de asfalto que se producían en México y su comparación con las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) para el año de 1987.....	62
Tabla 4.4: Ensayes utilizados por SHRP para cementos asfálticos	71
Tabla 4.5: Empleos recomendables del cemento asfáltico en la construcción de carpetas y sobrecarpetas. Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1957.....	91
Tabla 4.6: Recomendaciones de calidad para mezclas diseñadas con el procedimiento Marshall. Fuente: Normas de Construcción de la SCT, 1981.	109
Tabla 4.7: Requisitos de calidad para mezclas diseñadas con el procedimiento Marshall. Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1957.....	110
Tabla 4.8: Requisitos de calidad para mezclas diseñadas con el procedimiento Hveem. Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1957.....	112
Tabla 5.1: Etapas contempladas en cada uno de los niveles de diseño de una mezclas asfáltica de granulometría densa de alto desempeño.	118
Tabla 5.2: Prácticas recomendables para el control de calidad en campo de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño.	119
Tabla 6.1: Análisis de agregado grueso	128
Tabla 6.2: Análisis de agregado fino.	129

Tabla 6.3: Granulometría de los agregados pétreos.	129
Tabla 6.4: Granulometría de diseño.	130
Tabla 6.5: Resultados de diseño (*Obtenidos SUPERPAVE)	135
Tabla 6.6: Resultados de susceptibilidad a la humedad	137
Tabla 6.7: Resultados de rueda de Hamburgo del asfalto A.	139
Tabla 6.8: Temperaturas de mezclado, tendido y compactado.	165
Tabla 6.9 Calidad del cemento asfáltico empleado en el tramo de prueba.	169
Tabla 6.10: Espesores de la carpeta, obtenidos de extracciones.	196

Aplicación y revisión del Protocolo AMAAC 2008 mediante el análisis del estado del arte de las mezclas asfálticas y el seguimiento del tramo de prueba Sta. Rosa a La Barca del km 13 al 17.

1 Introducción.

Las mezclas asfálticas tienen un papel muy importante en el desarrollo de la infraestructura de México y del mundo, por ello actualmente existe bastante información técnica e investigaciones al respecto que datan aproximadamente del año 1950 a la fecha, sin embargo se carece de documentación sobre los orígenes, aproximadamente 1900, de las mezclas asfálticas en nuestro país, siendo información exclusiva de las personas que en su momento tuvieron la oportunidad de vivir y transmitir sus experiencias y vivencias de manera verbal.

Es sabido que los materiales de construcción al igual que los diferentes productos de consumo cotidiano sufren cambios notables en función de los avances tecnológicos y científicos, la mayoría de estos cambios son para mejorar sus características útiles. La pregunta a realizar es la siguiente: ¿cómo saber si vamos por el camino correcto en las investigaciones sobre mezclas asfálticas sí no

conocemos sus orígenes y sus cambios a lo largo de su historia? De aquí la necesidad de indagar al respecto y documentarlo de manera formal.

Por otra parte es necesario mencionar también las nuevas tendencias en el área de mezclas asfálticas, el Protocolo AMAAC es el nuevo método de diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño en México, desarrollado en el año 2008 por la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC) al ver la necesidad de contar en nuestro país con un método que contemple las condiciones prevalecientes para el territorio nacional. Con esta acción se pretende “poner un grano de arena” para lograr pavimentos de calidad que sean duraderos, seguros, confortables y económicos en construcción, mantenimiento y operación.

Para comprender mejor lo anterior; es conveniente mencionar que actualmente las carreteras son el detonante del movimiento de mercancías en nuestro país y en el mundo, de tal modo que una infraestructura vial adecuada mejora sustancialmente la economía de la región gracias a la facilidad de comunicación entre dos puntos que requieran de estar conectados. La conexión entre estos dos puntos requerirá de ciertas especificaciones en función del valor agregado de la mercancía que sea transportada por el camino.

Se entiende que un camino pavimentado es aquel que supuestamente proporciona las características adecuadas de geometría y estado superficial para transportar la mercancía con costos bajos, en la presente investigación se pretende lograr una mejora en el estado superficial del camino en pavimentos nuevos.

Un pavimento es una estructura compuesta de diferentes capas de material seleccionado que dan soporte a las cargas generadas por el paso de los vehículos, estos se dividen por el tipo de capa de rodamiento en rígidos y flexibles, los primeros con una superficie de concreto hidráulico y los segundos están compuestos con mezcla asfáltica en su capa de rodadura que a la vez es la que distribuye mejor los esfuerzos aplicados y proporciona la durabilidad del pavimento en lo que se refiere a soportar los efectos del clima y del tráfico aplicado, este último estrato formado por el mezclado entre material pétreo y cemento asfáltico.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), entidad normativa en México clasifica a las mezclas asfálticas de varias maneras, una de ellas es según el porcentaje de vacíos que contienen, en las que encontramos que la mezcla densa colocada en la mayoría de los pavimentos flexibles de México como capa de rodadura contiene un porcentaje de vacíos de entre 3 y 5% siendo el valor óptimo un 4%.

No es necesario realizar mucha investigación para determinar que los pavimentos en México tienen muchos problemas, basta con realizar observaciones por vías de circulación cotidiana para darnos cuenta que la mayoría de las carreteras estatales, federales, autopistas, calles, etc., tienen una gran cantidad de deficiencias que se ven reflejados en los costos de operación y estos a su vez en el costo final de la mercancía que fue transportada. En esta investigación se trabajará exclusivamente con el diseño de la mezcla asfáltica aplicando el Protocolo AMAAC.

Se espera que con la implementación del Protocolo AMAAC se aproveche de manera más razonable el asfalto, pues el 95% de las carreteras del mundo están hechas de este material, además de que es la parte principal de la superficie de rodamiento que se encuentra siempre en contacto con el usuario.

El método de diseño en cuestión, surgió por la necesidad de contar en México con un método de diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa que tome en cuenta las condiciones prevalecientes de la zona de aplicación para obtener como resultado un diseño adecuado. Actualmente la SCT acepta diversos métodos de diseño sin embargo se ha venido utilizando la metodología Marshall en la mayoría de los casos, pero este tiene el inconveniente de ser muy antiguo; del año 1943, si comparamos las cargas que se aplicaban en ese año, con el peso de los vehículos actuales, estamos hablando de que existen diferencias enormes, de la misma manera hoy en día se tiene mayor conocimiento del asfalto, los agregados minerales y también hay cambios considerables en el procedimiento constructivo.

En Estados Unidos de América (EUA) ya se ha optado por desplazar al método Marshall y sustituirlo por el SUPERPAVE (SUPERior PERFORMANCE PAVEMENT); método para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño desarrollado en 1993, el cual toma en cuenta características prevalecientes en los caminos de EUA y ha tenido mejoras notables en el comportamiento de las mezclas asfálticas, de la misma manera se tienen casos similares en la Unión Europea también con buenos resultados.

Al tener muchas características en común entre México y Estados Unidos; tráfico, condiciones de clima extremos, asfaltos, etc., en México y específicamente la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. formó un comité denominado *Comité de Desempeño de Mezclas Asfálticas* para desarrollar y analizar un método mexicano, así se llegó al Protocolo AMAAC para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño, el cual tuvo como antecesor al SUPERPAVE de EUA pero adaptado a las condiciones prevalecientes y a la tecnología disponible para su aplicación.

Las principales diferencias entre Marshall y el Protocolo AMAAC es que el segundo representa las condiciones a las que estará sometida la mezcla en el pavimento, tanto en el procedimiento constructivo como a lo largo de su vida útil, además de contemplar diferentes niveles de diseño según el número de ejes equivalentes esperados, también la obtención de módulos que servirán para el diseño del pavimento en conjunto y la determinación de la resistencia a la fatiga de la mezcla.

La finalidad de esta investigación es demostrar que un pavimento con mezcla asfáltica diseñada con el Protocolo AMAAC tiene un comportamiento superior a los construidos tradicionalmente y diseñados con Marshall o en ocasiones sin diseño alguno. Para demostrar la superioridad del desempeño de la mezcla diseñada con el Protocolo AMAAC se llevará el seguimiento, en campo y laboratorio, del tramo de prueba Sta. Rosa – La Barca en el estado de Jalisco y se recopilará información del tramo Monterrey – Cd. Mier en el estado de Nuevo León. En los próximos años, se tendrá en México una inversión en infraestructura carretera de gran importancia, por lo tanto es necesario que se realicen diseños adecuados que aseguren el objetivo de un pavimento; pavimentos seguros, confortables, duraderos y económicos que satisfagan las necesidades del usuario.

1.1 Objetivo

Validar la aplicación del Protocolo AMAAC para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño para su uso como capa estructural y superficie de rodamiento de pavimentos flexibles. Entiéndase por validar el hecho de su aplicación en laboratorio y en tramos de prueba para corroborar que se obtienen mejores resultados que utilizando algún otro método de diseño de mezclas existente en nuestro país.

Documentar los antecedentes de las mezclas asfálticas desde sus orígenes hasta la actualidad, como medio de difusión del protocolo AMAAC en el congreso mundial de la carretera.

1.1.1 Objetivos Particulares.

Documentar la historia de las mezclas asfálticas en México con la finalidad de contar en nuestro país con antecedentes de acceso público sobre la evolución de los productos asfálticos.

Validar para AMAAC el diseño seleccionado para ser empleado en la elaboración de la capa de mezcla asfáltica de granulométrica densa de alto desempeño.

Validar para AMAAC el procedimiento de elaboración de la mezcla, así como el procedimiento constructivo empleado para el tendido y compactación de la misma.

Evaluar los resultados observados en el tramo de prueba con mezcla diseñada mediante el Protocolo AMAAC y su comparación con los resultados analizados en laboratorio en condiciones controladas de la mezcla diseñada con el mismo método.

1.2 Planteamiento del problema.

1.2.1 Alcances.

Para lograr el objetivo, se llevará el seguimiento total de un tramo de prueba gestionado por la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC) ante la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). El tramo elegido para tal fin se localiza en el Estado de Jalisco el correspondiente a Sta. Rosa – La Barca del km 13+000 al 14+000, en el que se estará al pendiente desde el inicio de las actividades de construcción, verificando que la ejecución de los trabajos se lleven a cabo según el diseño, además se realizarán revisiones de la evolución que

tendrá en el transcurso del tiempo hasta que nos lo permita la presente investigación en cuestión del periodo disponible. Lo anterior con la finalidad de verificar la correspondencia que existe entre los trabajos realizados en el laboratorio y los elaborados en campo.

De la comparación de los resultados anteriores, se obtendrá como solución la validación, o en su caso el rechazo del Protocolo AMAAC con base a las mejoras sustanciales que brinde a la infraestructura de nuestro país; lo anterior ya que para realizar el diseño de mezclas con el mencionado Protocolo se necesitan equipos especializados y en ocasiones difíciles de conseguir, por lo tanto si las mejoras observadas al aplicar el nuevo método de diseño son muy pocas en comparación con la metodología existente no valdría la pena su aplicación en proyectos carreteros.

En caso de que no se llegue a una solución favorable, se propondrán recomendaciones para cumplir con la aplicación favorable del protocolo AMAAC a futuros tramos de prueba.

En lo referente al estado del arte de las mezclas asfálticas, se indagará consultando bibliografía especializada con la finalidad de obtener las diferentes líneas de investigación a seguir, también se entrevistará a personas con amplia experiencia en el ramo con la finalidad de documentar lo que hoy aun son simplemente experiencias y vivencias de un muy restringido número de personas que tuvieron la oportunidad de trabajar y/o simplemente de observar los procedimientos y materiales empleados en cada una de las etapas de la historia de las mezclas asfálticas.

Se realizará un documento que contenga los resultados de esta investigación y será editado por la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC) para ser presentado en el congreso mundial de la carretera PIARC que se realizara en México.

1.2.2 Objeto de estudio.

Se sabe que las mezclas asfálticas son la superficie de rodamiento de un pavimento flexible cuya estructura es una subrasante, subbase, base y la carpeta o mezcla asfáltica, esta última está compuesta por dos partes fundamentales; el agregado pétreo y un ligante asfáltico.

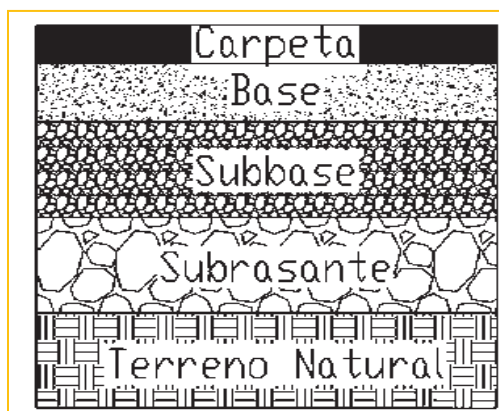


Fig. 1.1: Estructura típica de un pavimento flexible.

La contraparte son los pavimentos rígidos los cuales la superficie de rodamiento es de concreto hidráulico; agregado pétreo, agua y un cemento portland como aglutinante. Ambos pavimentos tienen un comportamiento diferente por lo tanto cada uno de ellos se recomienda para ser utilizado en donde las características del medio al que vaya a ser sometido sean las adecuadas para aplicar uno u otro tipo de pavimento.

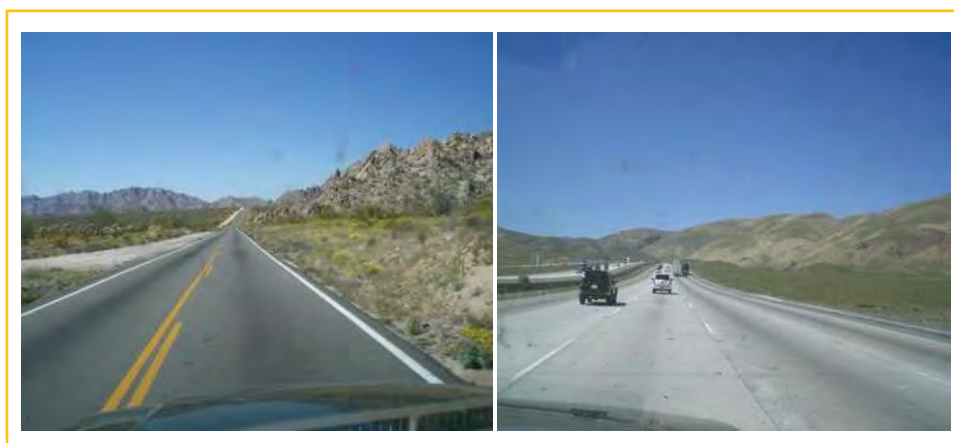


Fig. 1.2: Tipos de Pavimentos; flexible a la derecha y rígido a la izquierda

Las mezclas asfálticas se clasifican de diferentes maneras, para fines de esta investigación se mencionará la clasificación de acuerdo a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) que es la entidad normativa en México.

Por la fracción del agregado pétreo, se clasifica en mortero asfáltico y concreto asfáltico, la primera indica que está compuesta por arena o material fino, la segunda ya tiene una granulometría variada de los pétreos (gruesos y finos).

Clasificación de acuerdo a la temperatura de elaboración, mezcla asfáltica en frío; elaborada casi siempre en obra cuyos elementos principales son la emulsión y

el agregado pétreo, y la mezcla en caliente; elaborada en plantas de cierta magnitud por lo tanto no se facilita el manejo de esta en obra, la planta calienta el pétreo y al cemento asfáltico para generar una buena adherencia o fusión entre estos dos compuestos principales.

También se considera una clasificación en función de del porcentaje de vacíos de aire: mezclas densas o cerradas son aquellas que contienen del 3% al 5% de vacíos de aire considerándose como un óptimo el 4% de vacíos de aire generando una gran capacidad estructural, las mezclas abiertas tienen un porcentaje de vacíos de aire mayor o igual a 20% utilizada principalmente para capas drenantes.

Además de las mencionadas también están las mezclas asfálticas por el sistema de riegos; compuesta principalmente por material pétreo uniforme de $\frac{3}{4}$ " con un ligante asfáltico.

Tomando en cuenta lo anterior definimos nuestro objeto de estudio; se analizará una mezcla asfáltica en caliente de granulometría densa de alto desempeño.

1.2.3 Problemas particulares a resolver.

En primer lugar se atacará la falta de conocimiento y de información histórica sobre las mezclas asfálticas pues no existe ningún documento que exprese los orígenes y la evolución de éstas en México.

De igual manera en lo referente a la aplicación del protocolo AMAAC se pretende tener una gran influencia para la mejora en la calidad de los pavimentos y en específico de las mezclas asfálticas.

Al hacer la pregunta del ¿Por qué fallan los pavimentos? y observar en el medio que nos rodea las condiciones que prevalecen se ven cosas como las que muestran las figuras siguientes.



Fig. 1.3: Problemas localizados en nuestros alrededores.

En las imágenes anteriores, de izquierda a derecha; en la primera se puede concluir que el problema principal fue un mal diseño de la capa de rodamiento provocando agrietamiento prematuro por fatiga; en la segunda ilustración se muestra claramente un problema de drenaje y por consiguiente un mal diseño de la subestructura ocasionando que en la superficie se generen baches por socavación; en la última imagen mostrada se presenta un camión de doble semirremolque representando una carga mayor a la que probablemente fue diseñado el camino, teniendo en cuenta que si es un camino antiguo fue diseñado vehículos ligeros y al momento de llegar estos vehículos como los de la imagen hay una gran probabilidad de que el pavimento tenga una falla estructural por fatiga y también falla funcional por deformaciones.

Revisando la literatura, principalmente extranjera ya que en México hay pocas investigaciones al respecto, se define la siguiente relación con los pavimentos asfálticos:

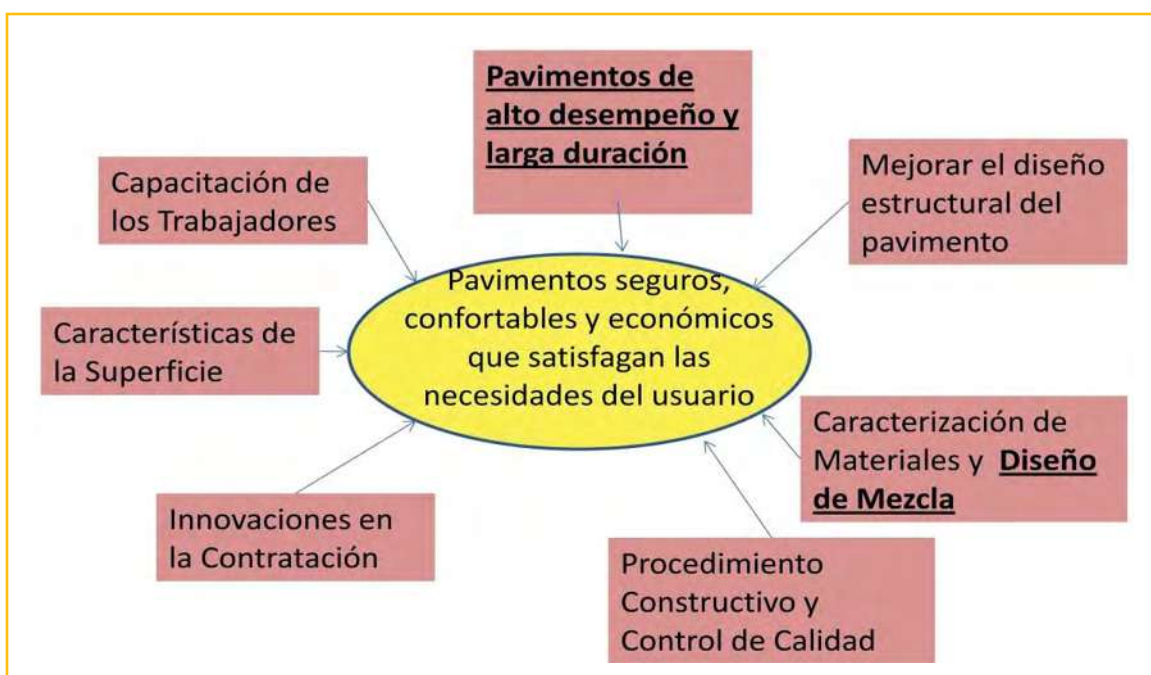


Fig. 1.4: Relación entre las diferentes áreas para cumplir con el objetivo en pavimentos.

En donde se tiene que la finalidad de un pavimento es, que sea seguro, confortable y económico que satisfaga las necesidades del usuario, para eso se requiere cumplir las características mencionadas en el diagrama anterior, sin embargo se puede observar que en México principalmente todo ello es un verdadero problema, en esta investigación atacaremos principalmente los problemas en el diseño de mezcla asfáltica, y con ello también cubrir una parte de lo que es control de calidad y características de la superficie, además de que la capa de rodamiento sea de alto desempeño y larga duración.

1.3 Justificación.

1.3.1 Importancia del producto del trabajo propuesto.

En el año 2007, en el estado de las carreteras según el tipo de superficie de rodamiento se muestra un porcentaje relativamente bajo de caminos pavimentados, comparándolo con años anteriores se observa que este porcentaje se ha mantenido alrededor del 33%, se puede observar en las siguientes figuras, en gran parte la causa es porque se destina mucho dinero a cuestiones de

mantenimiento y conservación, por lo tanto hay un poco avance en lo que son construcciones de caminos nuevos pavimentados. Al implementar el protocolo la finalidad es una vida mayor de uso de los pavimentos y por lo tanto una menor inversión a restauración de caminos viejos y de esta manera proporcionar más fondos a la construcción de nuevas vías.

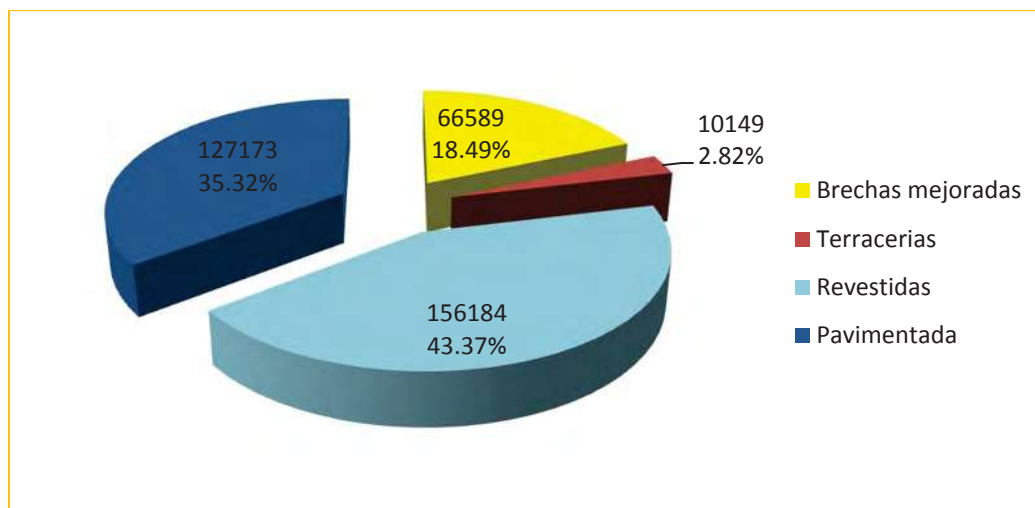


Fig. 1.5: Distribución de la longitud de la red carretera según superficie de rodamiento en Kilómetros y porcentaje, año 2007.

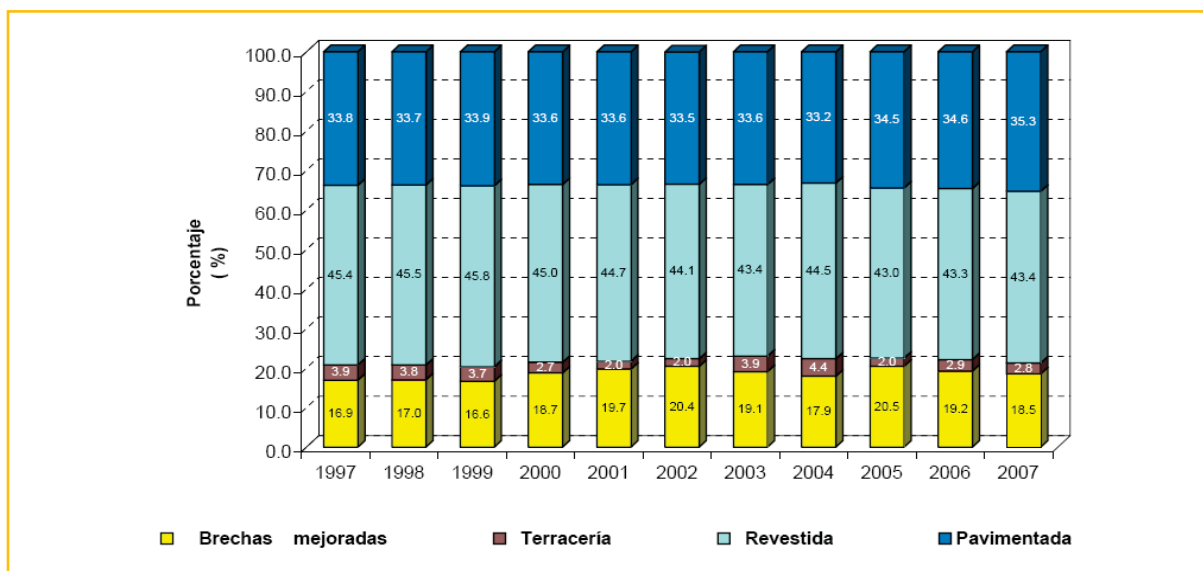


Fig. 1.6: Distribución porcentual de la longitud de la red carretera según superficie de rodamiento. (Fuente SCT)

Al realizar un inventario del estado físico de la red federal libre de peaje en carreteras pavimentadas y tomando como ejemplo el estado de Michoacán, se puede observar un gran porcentaje considerado como satisfactorio, en segundo

lugar no satisfactorio y por ultimo y un porcentaje muy bajo considerado como bueno. Cabe destacar que estos datos son obtenidos de la entidad federal encargada del mantenimiento y conservación, por lo tanto sería interesante los rangos que se manejen para determinar si el camino se considera en estado bueno, satisfactorio o no satisfactorio. Con el uso e implementación del Protocolo AMAAC se espera disminuir caminos en estado satisfactorio y no satisfactorio y aumentar los caminos en un estado bueno.

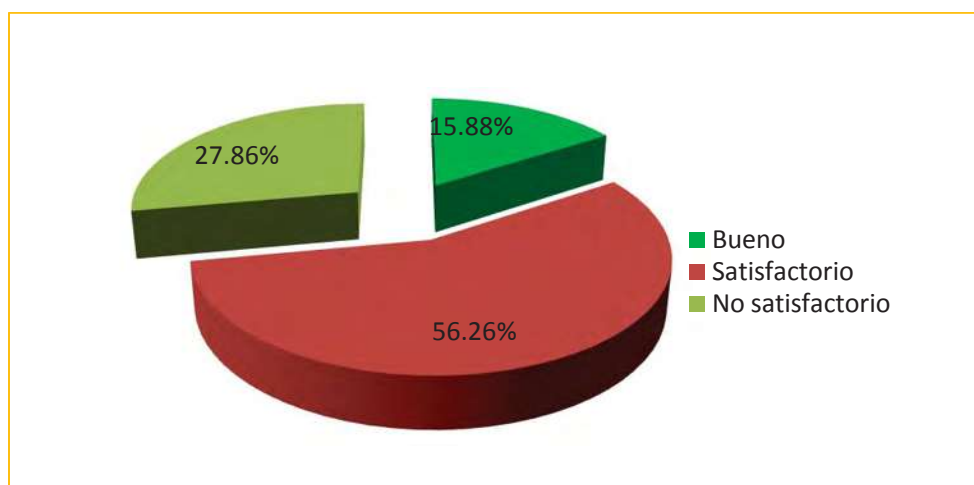


Fig. 1.7: Estado Físico en % de carreteras pavimentadas, año 2007. (Elaboración propia con datos de SCT)

Si se toma en cuenta la importancia de las carreteras por su Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) a través de los años, se puede esperar una fuerte inversión en caminos, comprobado con base a la demanda de los automóviles que usan estas vías, también se puede observar la gran superioridad del movimiento de pasajeros que se da por el modo de autotransporte que al que brinda el transporte aéreo, de la misma manera en el traslado de carga, se observa que el autotransporte es por mucho el principal modo de movimiento de carga comparándolo con el ferrocarril que es el inmediato inferior realizando la misma acción. En las siguientes figuras se observa la información anterior en manera de gráficos para una mejor revisión.

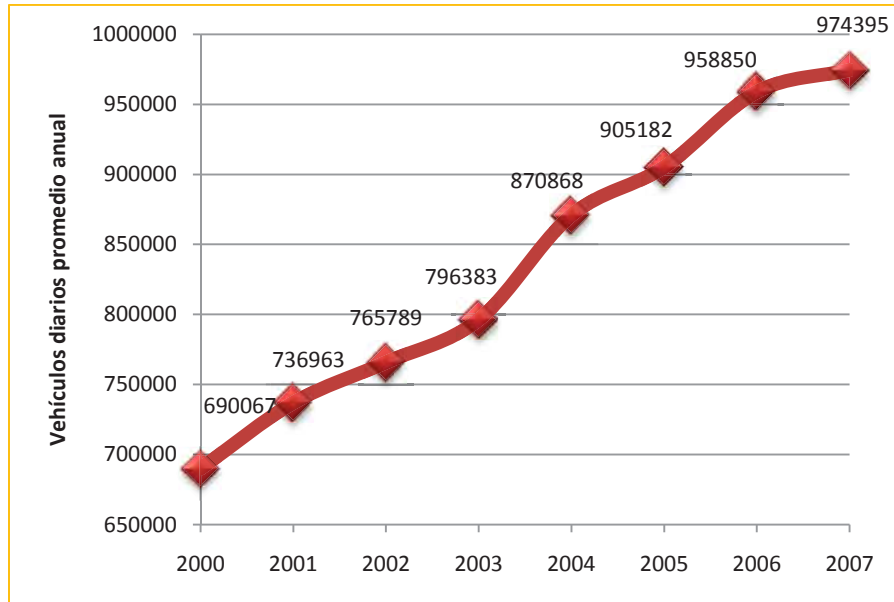


Fig. 1.8: Tránsito diario promedio anual en las autopistas de cuota. (Fuente SCT)

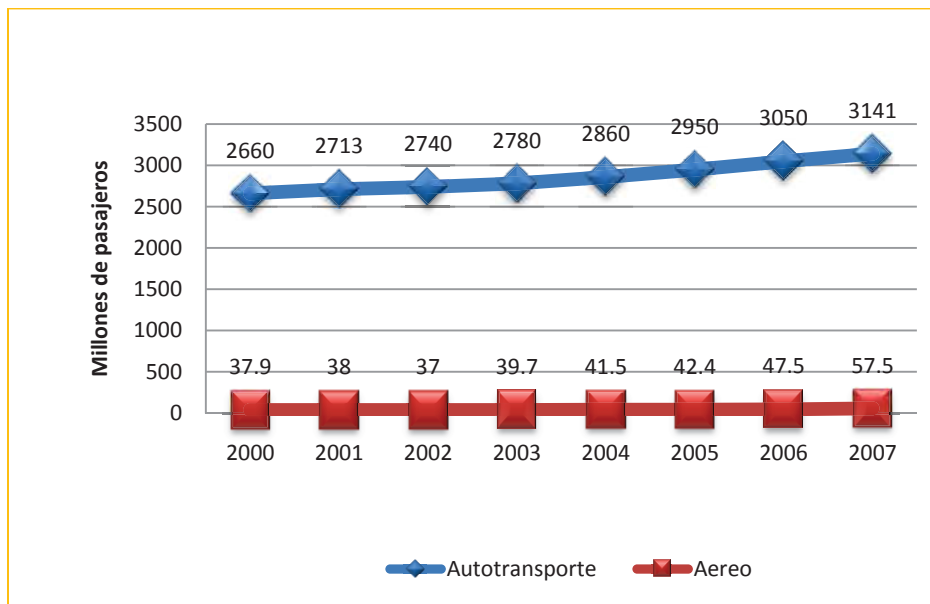


Fig. 1.9: Pasajeros por modo de transporte. (Fuente SCT)

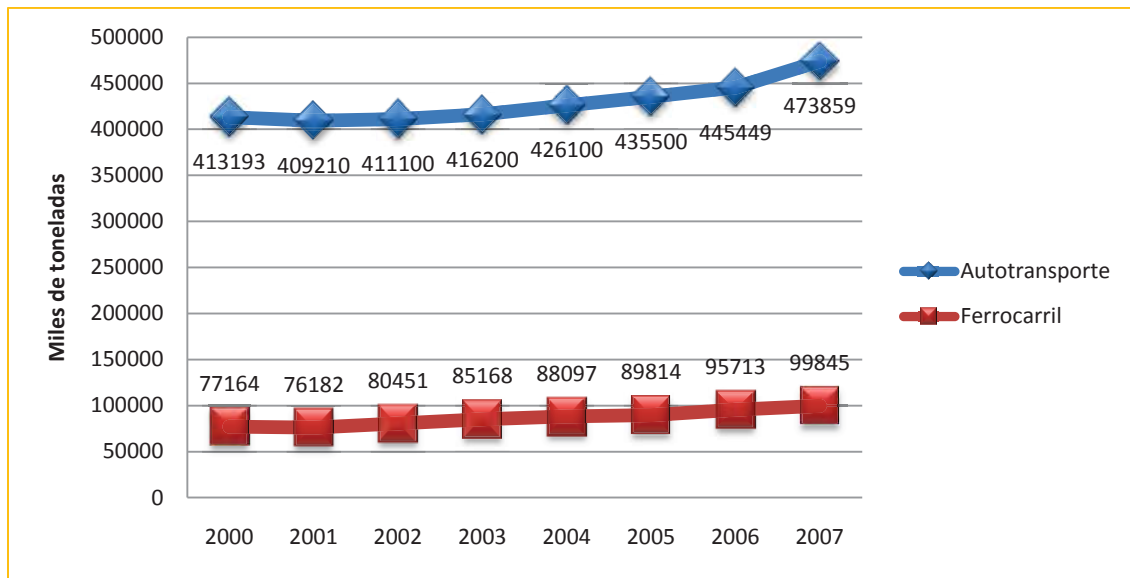


Fig. 1.10: Carga por modo de transporte. (Fuente SCT)

Hablando de costos de mantenimiento y operación, se ha adoptado el criterio en el que la meta del proyecto es que tenga un costo mínimo de inversión inicial generando una infraestructura deficiente que se verá reflejada en costos de mantenimiento y operación elevados, la prueba está en lo siguiente: considerando una carretera típica en México para un periodo de utilización de 40 o 50 años, el valor de su construcción es 1, su mantenimiento tendrá un costo de 10 o 12 veces el de construcción y lo que es peor, los costos de operación serán de 200, 400 o más los de su construcción. Ejemplo de costos de operación considerando un camión de carga de tipo normal: en función de la pendiente del camino por donde circula; el punto de referencia será en un terreno plano donde su eficiencia es optima, si el mismo camión circula por un terreno con pendiente de 3% sus costos de operación aumentaran un 50%, si esta pendiente fuese de 5 – 6% se tendrá un aumento en los mencionados costos del 100%. Ahora en función del estado superficial del camino por donde circula; un estado óptimo genera una eficiencia optima, un estado bueno representa un aumento de 15 a 20% en los costos de operación del vehículo de carga, una superficie de rodamiento mala ocasiona que los costos se eleven de un 35 a un 40%. Mencionado lo anterior sería conveniente razonar sobre las estadísticas mencionadas anteriormente sobre el estado de las carreteras y contestar a la pregunta ¿en realidad es necesario tener la red de caminos en condiciones óptimas?



Fig. 1.11: Representación de costos de operación = \$

Además si se continúa hablando de la importancia del asfalto en México y en el mundo. Más del 95% de los pavimentos del mundo están contruirdos con asfalto, es la parte más costosa de los pavimentos flexibles que además es la superficie de rodamiento y por lo tanto se encuentra en todo momento en contacto con el usuario. La finalidad del Protocolo es que la cantidad de asfalto a usar sea el optimo encontrando el equilibrio adecuado entre materiales pétreos y el cemento asfáltico.



Fig. 1.12: Mezcla asfáltica siempre en contacto con el usuario.

1.3.2 Probabilidades de éxito.

En el programa de Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres se cuenta con personal experto en el área de asfaltos, de la misma manera se tiene un gran vínculo con la Asociación Mexicana del Asfalto A.C. (AMAAC) por lo tanto se está familiarizado con el Protocolo AMAAC para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa y de alto desempeño.

Existen convenios de colaboración con empresas del sector público y privado dedicadas al estudio del asfalto y de los pavimentos, los cuales proporcionaran el asfalto necesario para la presente investigación.

La AMAAC ofrece para un servidor de manera gratuita cursos, seminarios y jornadas con el objetivo de capacitarme y realizar una investigación de excelente calidad y respaldada por la misma asociación.

Los laboratorios de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo tienen la mayor parte del equipo necesario para la elaboración y prueba de los materiales, en ocasiones algunas pruebas tendrán que ser realizadas en instalaciones de las empresas mencionadas anteriormente por lo tanto en este sentido no hay nada que pueda detener la investigación.

En cuanto a los recursos necesarios para llevar a cabo las diferentes actividades; el seguimiento del tramo de prueba Sta. Rosa – La Barca, los diferentes viajes a bibliotecas especializadas en la materia, las visitas para realizar las entrevistas entre otras actividades que surjan durante el transcurso de la investigación serán otorgados por la Asociación Mexicana del Asfalto A.C.

Por lo anterior, los resultados de la investigación en curso acrecentarían el conocimiento que se tiene de las mezclas asfálticas y su comportamiento, teniendo una aplicación directa e inmediata principalmente en el sector normativo y posteriormente en la construcción y mantenimiento de caminos con un correcto diseño para que estos últimos cumplan con el objetivo al que fueron proyectados o idealizados.

2 Antecedentes.

En México, la entidad normativa que vigila y regula la construcción, conservación y reconstrucción de carreteras y por lo tanto el diseño y elaboración de mezclas asfálticas es la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la cual dentro de sus normas acepta el uso de varios métodos de diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa como lo son el Hveem y Marshall, de éstos el más popular y usado casi en todos los diseños de mezclas en México es el método Marshall con el inconveniente de ser muy antiguo y como se sabe las condiciones a las que se encuentra sometida la mezcla en los pavimentos han cambiado drásticamente.

En países como los Estados Unidos de América (EUA) y la Unión Europea se han venido desarrollando métodos de diseño que tomen en cuenta las condiciones reales de construcción de la mezcla y el pavimento en su conjunto, las características de carga a la que será sometida, etc., de esta manera se ha generado mundialmente una gran experiencia en el manejo y diseño de las mezclas asfálticas, misma que se ha tomado en nuestro país para el desarrollo del Protocolo AMAAC 2008 para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa y de alto desempeño.

2.1 Método de diseño Marshall.

Este método es el utilizado actualmente para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa en México, sin embargo es muy anticuado pues fue formulado por el Ingeniero Bruce Marshall aproximadamente en los años 1930's durante la segunda Guerra Mundial como una medida emergente para el diseño de superficies de rodamiento en pavimentos nuevos que se construirían como accesos a los lugares estratégicos de interés para la milicia americana.

Es un método cuyo principio elemental fue el de prueba y error, desarrollado con base a iteraciones, probaban un tipo de mezcla y si no daba resultados positivos la desechaban, hasta encontrar un procedimiento que dio buenos resultados y que funciono por mucho tiempo, sin embargo fue propuesto para cargas muy pequeñas que en la actualidad son rebasadas por mucho.

El método Marshall es aplicable a mezclas en caliente con tamaño máximo de agregado (TMA) de 1", sufriendo una modificación para que tenga aplicación en mezclas de TMA mayores a 1.5".

Los principales aspectos a considerar durante este diseño son la Gravedad Específica, análisis de densidad y vacíos que representan lo que es el diseño volumétrico, estabilidad y flujo. La estabilidad y el flujo son medidas de una manera empírica y se entiende por la deformación que se genera en la probeta al ser sometidos a una carga durante un determinado tiempo.



Fig. 2.1: Compactación Marshall

Las especificaciones para el diseño de este método se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 2.1: requisitos de calidad para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall.

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ^[1]	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 \leq \Sigma L \leq 10^7$ ^[2]
Compactación: número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb), mínimo	5 340 (1 200)	8 000 (1 800)
Flujo; mm(10^{-2} in)	2 - 4 (8 - 16)	2 - 3.5 (8 - 14)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 - 5	3 - 5
Vacios ocupados por el asfalto (VFA); %	65 - 78	65 - 75
[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8.2 ton, esperado durante la vida útil del pavimento.		
[2] Para tránsitos mayores de 107 ejes equivalentes de 8.2 ton, se requiere un diseño especial de la mezcla.		

Tabla 2.2: Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall.

Tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla [1]		Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC) de diseño %		
		3	4	5
mm	Designación	Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo		
9.5	3/8 "	14	15	16
12.5	1/2 "	13	14	15
19	3/4 "	12	13	14
25	1 "	11	12	13
37.5	1 1/2 "	10	11	12

[1] El tamaño nominal corresponde al indicado en la Cláusula D, de la norma M-CMT-4-04.

Otro de los inconvenientes que se tiene de este método es que es poco representativo de las condiciones a las que la mezcla estará sujeta durante su etapa constructiva y en su vida útil.

2.2 Método SUPERPAVE.

El método SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement) desarrollado en 1993 surgió de la necesidad que ahora se vive en México de establecer un procedimiento de diseño que tome en cuenta las condiciones actuales del tránsito y de los nuevos avances que se tienen en cuestión de asfaltos modificados.

Teniendo como objetivo principal especificar cemento asfáltico y agregado mineral, desarrollar de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento, evaluando los componentes de manera individual y su interacción ya mezclados.

Es un método que trata de representar en laboratorio lo que sucede en la etapa constructiva y también durante su vida útil. Se utiliza el compactador giratorio de acuerdo a la siguiente tabla, de manera que represente la etapa de compactación en la obra con un rodillo liso o neumático.

Tabla 2.3: Especificaciones de uso del compactador giratorio.

Esfuerzo Vertical	600 kPa
Ángulo de giro	1.25°
Velocidad de giro	30 rpm

El número de giros de dicho compactador, estará en función de la temperatura del lugar en donde se planea colocar la mezcla y del número de ejes equivalentes esperados durante su vida de diseño.

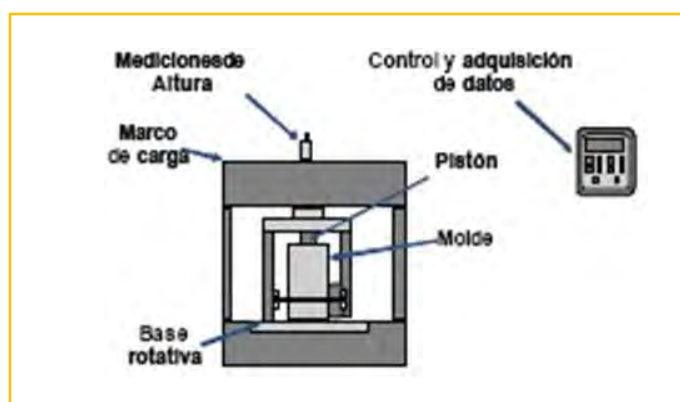


Fig. 2.2: Esquema representativo del compactador giratorio.

Este método nos pide una serie de requerimientos para el diseño de mezclas asfálticas, como lo son: Volumétricos; es necesario tomar en cuenta los vacíos de aire, vacíos del agregado mineral y los vacíos llenos de asfalto. Cuidar la proporción de polvo o filler y susceptibilidad a la humedad.

Existen 3 niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 80 KN (18,000lb).

Nivel 1 cuando se tienen 1, 000, 000 o menos ejes equivalentes se realiza el diseño solamente por especificaciones granulométricas y volumétricas.

Nivel 2 cuando se espera un tránsito mayor a 1, 000, 000 pero menor a 10, 000, 000 ejes equivalentes, se diseñara por especificaciones granulométricas y

volumétricas, además de tomar en cuenta la deformación permanente, fatiga y temperatura.

Nivel 3 se proyecta para un tránsito mayor a 10, 000, 000 ejes equivalentes y toma en cuenta el nivel 2 pero a mas detalle con especificaciones más estrictas.

2.3 Protocolo AMAAC 2008.

Es la nueva propuesta para el diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño en México, surge con la necesidad de desplazar al método Marshall y para colocarse dentro de la normativa nacional.

Es un sucesor del SUPERPAVE que se desarrollo en Estados Unidos, pero adaptado para las características particulares de nuestro país, el diseño de la mezcla se realiza en 4 niveles que se encuentran en función de la cantidad de tránsito y de la importancia de la carretera en donde se aplicará. Obsérvese la tabla siguiente.

Tabla 2.4: Niveles de diseño en función del número de ejes equivalentes de 8.2 ton y/o el tipo de proyecto.

Designación del nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes	Tipo de carreteras usuales
Nivel I Tránsito bajo	Menor a 1'000,000	Carreteras federales tipo D Carreteras alimentadoras Carreteras estatales y municipales Calles urbanas
Nivel II Tránsito medio	de 1'000,000 a 10'000,000	Carreteras estatales Carreteras federales tipo B y C Vialidades urbanas
Nivel III Tránsito alto	de 10'000,000 a 30'000,000	Carreteras federales tipo A Autopistas de Cuota
Nivel IV Tránsito muy alto	más de 30'000,000	Carreteras federales troncales Autopistas de cuota importantes Vialidades suburbanas en ciudades muy grandes

Especificando para cada uno de los niveles determinadas pruebas en donde la mezcla debe de cumplir con una serie de requisitos. Ver figura siguiente:



Fig. 2.3: Niveles de diseño para mezclas asfálticas.

De manera similar al SUPERPAVE, la compactación se realiza con el compactador giratorio que representa la acción de los rodillos al momento de compactar la mezcla en la obra.

Se emplean dispositivos para medir el desempeño de la mezcla, representando el paso de los vehículos durante la vida de diseño, obteniendo como resultado deformaciones permanentes en la mezcla.

Sin embargo por el hecho de ser un método de diseño de reciente desarrollo, es susceptible de errores y se tiene un poco dominio del manejo del mismo. Se espera que en un futuro no muy lejano se implemente este Protocolo como Normativa Nacional de la misma manera que lo han hecho países Europeos, Sudamericanos y Estados Unidos que se han inclinado por adoptar nuevos métodos de diseño con buenos resultados.

3 Hipótesis de trabajo.

Se espera que la mezcla diseñada con el Protocolo AMAAC muestre mejor comportamiento que la diseñada con métodos tradicionales, aumentando durabilidad y desempeño.

Corroborar que efectivamente lo analizado en laboratorio durante el diseño representa las condiciones a las que será sometida la mezcla asfáltica durante la elaboración, construcción y vida útil.

Como resultado de la presente investigación, se obtendrán una serie de recomendaciones para elaborar en campo la mezcla asfáltica diseñada con la aplicación del protocolo AMAAC.

Se indagará en los medios posibles el estado del arte de las carreteras en México, se espera que sea una tarea bastante compleja por la falta de información, pero de bastante relevancia.

4 Estado del arte de las mezclas asfálticas en México.

4.1 Orígenes del cemento asfáltico.

En México, los materiales asfálticos son utilizados en la mayor parte de las obras de pavimentación que se construyen y generalmente con ellos se integran las capas superiores de los pavimentos, principalmente las capas de rodamiento y las que sirven de protección a la obra; de esta forma, por razones económicas y de disponibilidad de materiales, los asfaltos han sido la solución natural de los pavimentos, tomando en cuenta sus buenas propiedades de consistencia, aglutinamiento, durabilidad e impermeabilidad.

Es sabido que el cemento asfáltico es parte fundamental para la elaboración de las mezclas asfálticas, por ello es conveniente dedicar un capítulo de este texto a la evolución y características de los asfaltos mexicanos para que se pueda comprender más su origen, producción, distribución y la gran variedad de aplicaciones que de él se puede hacer uso. Pues el desarrollo de las mezclas asfálticas va de la mano con los cambios que se tienen en los elementos que la constituyen, en este caso el cemento asfáltico llamado anteriormente “chapopote”.

4.1.1 Antecedentes generales.

Se tiene conocimiento que la primera aplicación del asfalto para la construcción de caminos se realizó en Babilonia aproximadamente 625 años antes de Cristo, para esta época también los griegos estaban muy familiarizados con el uso del asfalto y los romanos lo utilizaban como recubrimiento de sus acueductos. La palabra asfalto proviene del griego *asphaltos* que significa seguro.

Durante las exploraciones europeas en el nuevo mundo, aproximadamente en 1595, se descubrieron depósitos naturales de asfalto. Walter Raleigh describe un lago de asfalto sobre la isla de Trinidad cerca de Venezuela. Utilizó este material para recalafatear sus propias embarcaciones.

Excavaciones que se realizan en Coatzacoalcos, Veracruz, demostraron que 200 años antes de Cristo los pobladores olmecas de esa región del Golfo de México ya usaban el petróleo –para calafatear sus canoas y en actos rituales y ceremoniales– en forma de chapopote, voz formada desde entonces por la unión de tres palabras mayas (*chaách*: mascar; *paak*: embarrar, y *p'ó*: lavar), que pasaría al nahuatl como *chapopotl*.

En la época precolombina el petróleo no pasaba de ser entre los individuos un ungüento de valiosas propiedades curativas, brea, incienso para ceremonias religiosas y en contados lugares, combustible para lámparas rústicas.

Chapopoterías se le nombraba a los afloramientos naturales de petróleo, sin embargo este hidrocarburo tenía las características de lo que conocemos como asfalto; pues pasó por un proceso de destilación natural en el que los materiales volátiles se separaron de éste otorgándole las características mencionadas.

Hasta antes de este descubrimiento, las noticias más antiguas ligadas al chapopote señalaban que en 1540 éste brotó en la Villa de Guadalupe, dentro del templo de la Colegiata, y que los clérigos lo vendieron durante más de 300 años como medicina contra la reuma y aceite para las lámparas. En 1575, Ortellius, cartógrafo español, ubica con el nombre de *Piscis Fontes* las chapopoterías del cerro de La Paz, en lo que ahora es la Huasteca potosina. Y Melchor de Alfaro, en 1579, escribe acerca de “fuentes de agua que se cuaja con el sol”, en la Villa de Tabasco.

Los asfaltos utilizados por nuestros ancestros, fueron obtenidos por su recolección en depósitos o acumulaciones naturales. Para 1987 aún era común encontrar afloraciones naturales también llamadas chapopoterías en tierra o bien en las playas de nuestras costas, principalmente del golfo de México, en donde se presentaban numerosas afloraciones submarinas de petróleo en forma de bolitas o conchuelas de asfalto, conocidas en las costas de Tamaulipas, Texas y Lousiana como bolas de chapo o Tar Balls.

Hacia 1770, en el marco de las reformas borbónicas, Carlos III determina que serán propiedad de la corona “todos los bienes del subsuelo”, en obvia referencia a los metales pero también a las sustancias que “trasude” la tierra en los dominios del imperio español. Siglo y medio después, en 1859, el coronel Edwin L. Drake abre en Pensilvania el primer pozo petrolero del mundo.

Ese mismo año, Matías Romero, embajador de México en Estados Unidos, le escribe a Benito Juárez: “El aceite sustituirá dentro de poco al carbón de piedra y a la leña y será el único combustible que llegue a usarse. Esta nueva fuente de inmensa riqueza descubierta en este país, ha hecho pensar a los especuladores de mayor espíritu de empresa que en México debe haber venedores más ricos que los de Pensilvania”.

En 1863, Manuel Gil y Sáenz obtienen 10 barriles de petróleo de un pozo en Tepetitán, Tabasco, y los envía a Nueva York. Al mismo tiempo, Maximiliano intenta reglamentar la extracción de “betún” y otorga 38 concesiones petroleras a mexicanos. En 1864, Ildefonso López denuncia 21 lotes petroleros en Veracruz y se le concedió un permiso para explotar sustancias petroleras en San José de las Rusias y Chapopote en Tamaulipas y en la vecindad de Ébano, en Veracruz. Esta fue la primera concesión de que se tiene noticia y que probablemente se refiere a la explotación de depósitos superficiales de chapopote. En 1876, un marino bostoniano abre tres pozos de 200 metros de profundidad cerca de Tuxpan, Veracruz, y saca un aceite que transforma en kerosene, pero como no consigue financiamiento para expandir su negocio, se suicida. Un grupo de ingleses se queda con su propiedad y crea el London Oil Trust.

En abril de 1881, un estadounidense llamado Adolf Autrey toma posesión de “una mina de petróleo” en Papantla, Veracruz. En 1883, el gobernador de Tabasco, Simón Sarlat Nova (Pemex lo homenajeó con el nombre de la gasolina Nova) organiza la explotación de varias chapopoterías cerca de San Juan Bautista (hoy Villahermosa), pero la empresa fracasa.

El presidente Manuel González promulga en 1884 el Código de Minas que, en oposición a la reforma borbónica, reconoce al propietario de la tierra como dueño de las “sustancias inorgánicas distintas de las rocas” que haya en el subsuelo. Y Henry Clay Pierce funda en Tampico la Waters Pierce Oil Company, subsidiaria de la Standard Oil Company de la familia Rockefeller.

En 1886, Angel Sáinz Trápaga, comerciante español, establece en Veracruz una pequeña refinería llamada Compañía Mexicana de Petróleo. Un año más tarde, Porfirio Díaz dicta una ley que exime del pago de impuestos a las empresas petroleras. En 1894, Estados Unidos anuncia que su producción de petróleo asciende a 50 millones de barriles anuales.

Para los ganaderos y agricultores del Golfo las “chapopoterías”, o sea, los charcos formados por los brotes de petróleo, son una maldición porque en ellos se ahogan las reses; además, afectan las cosechas y dañan las tierras de cultivo. De

eso se aprovecharán los inversionistas extranjeros para comprar baratos los terrenos donde instalarán sus negocios.

En mayo de 1900 Edward L. Doheny y C. A. Canfield (dos prósperos petroleros de California) y A. P. Maginnis (un funcionario ferrocarrilero del Estado) fueron invitados por el entonces presidente de la compañía del Ferrocarril Central Mexicano, A. A. Robinson, quien abrigaba esperanzas de que se encontrara petróleo cerca de sus líneas de ferrocarril.

Al contemplar las chapopoterías del cerro de La Paz, adquirieron de inmediato la Hacienda de Tulillo, donde se encontraba este cerro. En 1901, Doheny comienza a perforar su primer pozo en la hacienda de El Tulillo, cerca de Tampico.

El 24 de diciembre de ese año, Díaz expide la primera Ley del Petróleo, según la cual sólo se podrán explotar concesiones otorgadas por el gobierno y los permisos de exploración “causarán un impuesto de 5 centavos por hectárea”. Para reducir su dependencia de los estadounidenses, Díaz concede terreno a empresas canadienses, holandesas, francesas, inglesas y alemanas a lo largo de la Faja de Oro del Golfo, que abarca el norte de Veracruz y el sur de Tamaulipas.

Doheny crea la Mexican Petroleum Company y de su primer pozo brota aceite a 545 metros de profundidad. Por su parte, en 1902, el británico Weetman D. Pearson pone en marcha la S. Pearson & Son Ltd e inicia exploraciones en el Istmo de Tehuantepec. En 1904, Doheny obtiene ya mil 500 barriles diarios del pozo La Paz No.1. Con este pozo puede decirse que se inicia la industria petrolera en México y en 1905 firma contrato para que los ferrocarriles del gobierno de Díaz consuman petróleo refinado en Ébano, Tamaulipas.

Entre 1905 y 1908, Pearson, favorito de don Porfirio, signa convenios con los gobiernos de Tabasco, Chiapas, San Luis Potosí y Veracruz para explotar campos petroleros. El 13 de agosto de 1908, la empresa de Pearson se convierte en Compañía Mexicana de Petróleo El Águila y el magnate inglés se compromete a pagar al fisco federal 7% de sus utilidades y 3% a los gobiernos de los estados.

Sir Weetman Pearson, después de Lord Cowdray, la cabeza de la firma internacional Pearson and Company de Londres, constructor del Gran Canal del Desagüe del puerto de Veracruz y que iniciaba entonces la construcción del Ferrocarril de Tehuantepec.

Antes del estallido revolucionario, en 1910, el pozo Juan Casiano, de Doheny, nace produciendo 25 mil barriles al día. En 1911, una nueva empresa, la Huasteca Petroleum Company, exporta 30 mil 262 barriles de crudo a Texas por barco. La

Penn Mex Oil descubre petróleo junto al río Tuxpan y la East Coast Oil en la región de Pánuco, Veracruz.

Sin embargo varios empresarios como Doheny, se valían de cualquier recurso para adquirir grandes porciones de tierra, haciendo famosa la célebre frase *o me vendes o le compro a tu viuda*. Otros más como ejemplo Cowdray que prefería arrendar los terrenos obteniendo prácticamente la misma ventaja que sus competidores.

En realidad los estadounidenses e ingleses dedicados al petróleo en México, eran, en palabras de O'Connor *bucaneros, dedicados puramente al saqueo*. Estas acciones de los petroleros fueron las que llevaron al gobierno de Carranza que se fuera pensando en la nacionalización mediante la prohibición a los extranjeros de solicitar la protección de sus gobiernos sobre sus propiedades en territorio mexicano, pues respecto de ellas debían considerarse como nacionales.

Surgiendo también lo que fue La Doctrina Carranza la cual recalca que la diplomacia no debe estar al servicio de los intereses particulares ni tampoco utilizarse para ejercer presiones sobre las naciones débiles con el objeto de que modifiquen las leyes que no les convienen a los poderosos.

En 1919 lord Cowdray se quiso olvidar de los problemas petroleros en México para disfrutar de su fortuna y vendió la mayor parte de su compañía a Shell, cambiando completamente de propietario en 1923. Sus utilidades consolidaron un auténtico imperio privado. Doheny seguiría su ejemplo en 1925 cuando transfiere todos sus intereses a Exxon.

Con la salida de Cowdray y Doheny del país, termina la época de los aventureros en busca del *oro negro* e inicia el dominio del negocio petrolero por parte de algunas de las empresas hermanas y otras compañías menores.

Durante estos años y hasta 1934 cuando el general Lázaro Cárdenas se hizo cargo del gobierno y sabía que algunas de las zonas de la Faja de Oro les habían sido robadas a sus legítimos dueños, se vivió una etapa de incertidumbre en cuanto a la nacionalización petrolera, ya que puede decirse que la expropiación petrolera fue anunciada por primera vez en el Plan Sexenal 1934 – 1940.

En la madrugada del viernes 18 de marzo de 1938, el general Cárdenas envió un mensaje a la nación que sorprendió a propios y extraños. Haciendo patente la desobediencia en que habían incurrido las compañías petroleras ante el fallo recientemente emitido por la Suprema Corte de Justicia, señaló el daño que un precedente de esa índole crearía frente a litigios análogos si el Estado no podía exigir el cumplimiento de sus propias leyes.

Arremetió en seguida contra las empresas foráneas por haber realizado campañas de desprestigio en el exterior contra el gobierno mexicano, advirtiendo que el embargo de la producción o sobre las instalaciones de los fondos petroleros traería serios obstáculos para el desarrollo normal de la industria y del país. Por todo ello el presidente Cárdenas decidió aplicar la Ley de Expropiación, no únicamente con el fin de someter a las empresas petroleras al fallo del Tribunal Supremo, sino también ante la ruptura de los contratos colectivos de trabajo presentados por el sindicato.

Al día siguiente apareció en el Diario Oficial de la Federación el decreto que declaraba expropiados por causa de utilidad pública, en beneficio de la nación, la maquinaria, instalaciones, edificios, oleoductos, refinerías, tanques de almacenamiento, vías de comunicación, carros-tanque, estaciones de distribución, embarcaciones y todos los demás bienes muebles e inmuebles necesarios, a juicio de la Secretaría de la Economía Nacional, para el descubrimiento, captación, conducción, almacenamiento, refinación y distribución de los productos de la industria petrolera.

El embajador de Estados Unidos en México, Josephus Daniels, predijo que nos hundiríamos en nuestro propio petróleo, a lo que el presidente Cárdenas (citado por O'Connor) contestó: Si los campos de petróleo más ricos del mundo son un obstáculo para el mantenimiento de nuestra dignidad, podemos prender fuego a esos campos, antes que sacrificar nuestro honor.

El 7 de junio de 1938 se crea, por decreto, la compañía estatal Petróleos Mexicanos (Pemex) y la Distribuidora de Petróleos Mexicanos, fusionándose estas en 1940. Tuvo que enfrentar grandes dificultades al ocupar las instalaciones abandonadas, pues estaban en condiciones deplorables. Sin embargo citan algunos escritores que los mexicanos se las arreglaron de cualquier modo para crear un fondo que pusiera en marcha a Pemex.

La calidad del asfalto, desde principios de siglo, fue reconocida como óptima por la producción en los campos petroleros de la Huasteca Veracruzana, particularmente del campo Pánuco. Hacia la segunda década del siglo XX se reconocía internacionalmente que gran parte de Europa, pero sobre todo Inglaterra, habían sido pavimentadas gracias a la inmejorable calidad del asfalto del Pánuco mexicano, que por su naturaleza nafténica y su elevada concentración de azufre, puede producir carpetas asfálticas de gran resistencia y durabilidad. El asfalto Pánuco tiene una composición de 27% asfaltenos, 31% de resinas y 42% de aceites.

Desafortunadamente la alta demanda de este crudo y la baja producción hacen que ya no se pueda depender del asfalto que de él proviene, obligando a los productores a buscar la disponibilidad de otros crudos pesados, pero principalmente intermedios como el crudo maya.

4.1.2 Definición y composición del cemento asfáltico

Para 1987 se consideraba al asfalto como un material bituminoso, solido con propiedades aglutinantes, que se vuelve pastoso y se licúa por calentamiento, estaba integrado desde el punto de vista químico por sustancias complejas constituidas por macromoléculas que contienen como elemento principal el carbono, pero que también tienen cantidades significativas de hidrógeno, azufre y varios metales, en estos últimos se identifican productos de la degradación de los hidrocarburos y de las petroporfirinas.

Desde estas fechas ya se sabía que cualquier país que buscara alcanzar y conservar la modernidad, es indispensable que cuente con la disponibilidad de materiales asfálticos de buena calidad, pero también, que cuente con conocimientos científicos y tecnológicos adecuados, que le permitan entender la naturaleza de los mismos.

Tradicionalmente, la estructura química del asfalto ha sido descrita en base a la proporción del mismo en fracciones, utilizando solventes como pentano, heptano, butano o hexano, así como ácido sulfúrico en diferentes concentraciones y los métodos más conocidos de este sistema son el de precipitación química desarrollado por Rostler y Stemberg (ASTM 2006) en 1963 y que separa el asfalto en cinco fracciones (asfáltenos, acidafenos primarios y secundarios, parafina y bases de nitrógeno) el de Corbett (ASTM 4124), a base de columna cromatográfica al separar el asfalto en cuatro fracciones (asfáltenos saturados y aromáticos, nafténicos y polares) con separación a base de heptano, tolueno, tricloroetileno y el de Traxler que aplica butano y acetona para obtener tres fracciones.

Los métodos de Corbett y Rostler están basados en teorías bien fundadas, pero los resultados son difíciles de correlacionar con lo que realmente ocurre en el asfalto, con sus propiedades físicas y su aplicación en un pavimento, debido quizá a que la separación es incompleta, se tiene contaminación de moléculas que no son solubles de acuerdo a los métodos y que además estos sistemas son difíciles

de llevar a cabo y sobre todo, el método de Rostler que emplea materiales peligrosos.

De acuerdo a estos ensayos los asfaltos se clasificaban en dos grandes grupos los tipo "Gel", donde los asfáltenos están floculados y su comportamiento es visco elástico (no newtoniano) y los tipo "Sol" donde los asfáltenos están peptizados y su comportamiento es cercano a un líquido newtoniano.

Considerando que un asfalto está compuesto de dos fases una asfálténica y otra malténica, la cual se puede dividir en dos fracciones: resinas que contienen moléculas parafinicas y nafténicas de largas cadenas de anillos y la otra de aceites peptizados, cuya misión es disolver y mantener en suspensión las resinas y los asfáltenos, su composición varia y puede ser definida como un coeficiente de inestabilidad coloidal de acuerdo a la siguiente relación:

El aumento de este coeficiente, da asfaltos más duros y con mayores valores en punto de reblandecimiento, ductilidad y recuperación elástica, pero disminuye la penetración y la susceptibilidad térmica.

Los asfáltenos son los responsables de las características de dureza y resistencia de los asfaltos, las resinas le proporcionan al asfalto sus propiedades cementantes o adhesivas y los aceites aportan al asfalto la consistencia adecuada para ser trabajables, además de proteger a los asfaltenos y a las resinas de la oxidación provocada por agentes del intemperismo y disminuyen los efectos perjudiciales que sufre el asfalto en los procesos de calentamiento que se emplean en las plantas de producción de mezclas asfálticas.

El asfalto se puede encontrar en forma natural o se puede obtener mediante el proceso de destilación y de los residuos de las desasfaltadoras. Siempre, cual sea la forma de producción, debe de cumplir con las especificaciones de calidad para las aplicaciones que correspondan.

La materia prima básica utilizada en la elaboración de los asfaltos es un residuo pesado proveniente de la destilación de algunos tipos de crudos de petróleo que se extraen del subsuelo de México; esencialmente PEMEX utiliza el residuo asfáltico pesado proveniente de las torres de destilación de alto vacío, al que se adicionan e incorporan en tanques especiales, otros productos del petróleo más ligeros, en proporciones adecuadas para lograr las características que se especifican.

Una vez que el asfalto ha sido elaborado y se verifica que cumple con los requisitos del tipo requerido, se pone a disposición de los transportistas o consumidores en los tanques de preparación o en los de almacenamiento que se tienen dispuestos para tal fin.

Es necesario conocer el equilibrio que se obtiene entre los asfaltenos y los aceites por medio de la adecuada estabilidad que producen los agentes peptizantes.

Con frecuencia nos encontramos que aún grandes consumidores de asfaltos descuidan el aspecto técnico y caen en el error o la rutina de creer que cualquier material negro y viscoso es de una materia asfáltica adecuada, encontrando como resultado costosos fracasos al obtener pavimentos asfálticos con una muy pequeña vida útil para el tráfico vehicular existente.

El comportamiento del asfalto en pavimentos depende de la temperatura y del tiempo de carga; de manera que a temperaturas altas o bajo cargas sostenidas el cemento asfáltico se comporta como un líquido viscoso que tiende a deformarse; a temperaturas bajas o bajo condiciones de carga ligeras y aplicadas repetidamente el asfalto se comporta como un sólido elástico, al aplicarle la carga se deforma y regresa a su forma original cuando esta carga es retirada.

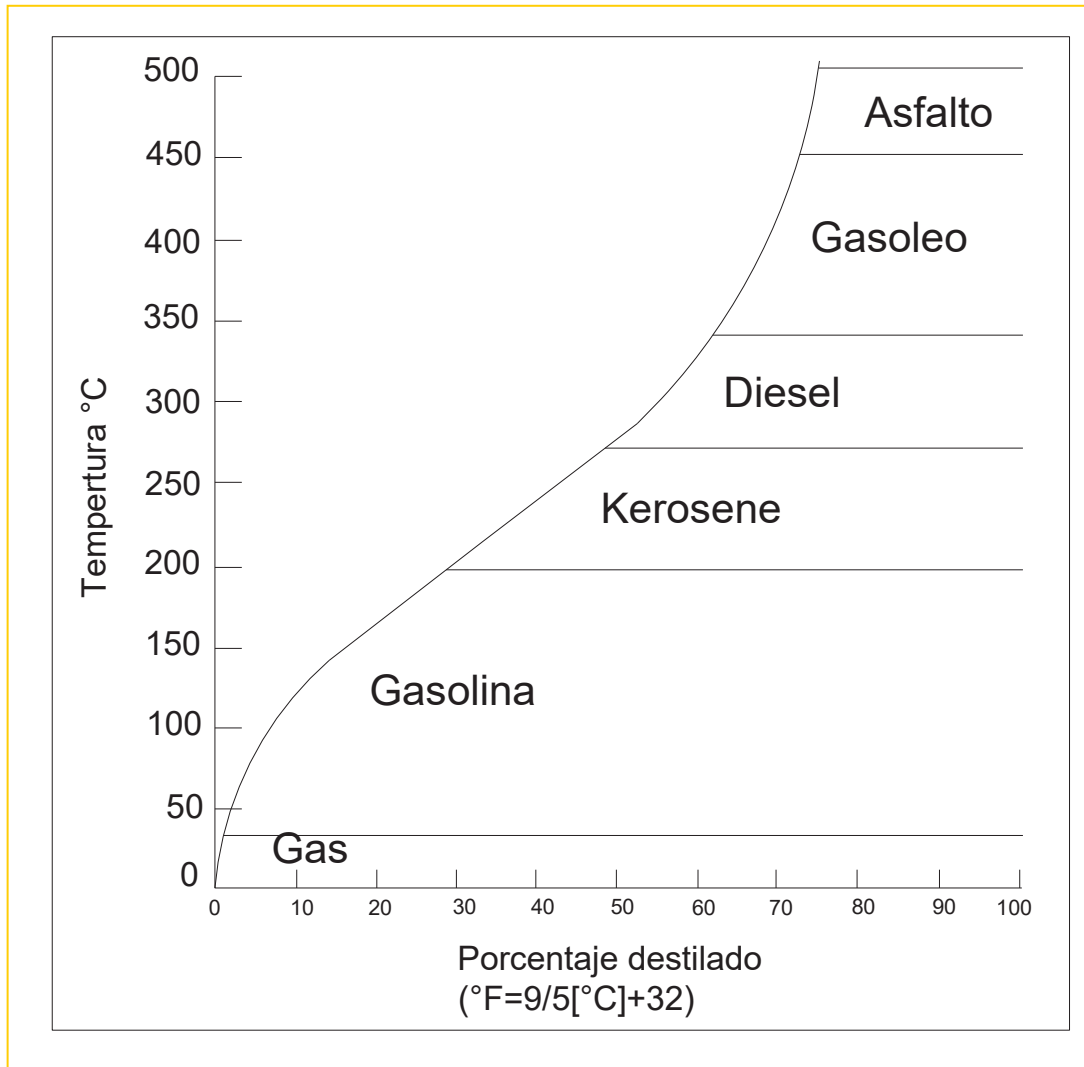


Fig. 4.1: Productos y temperaturas típicas de destilación de crudo de petróleo.

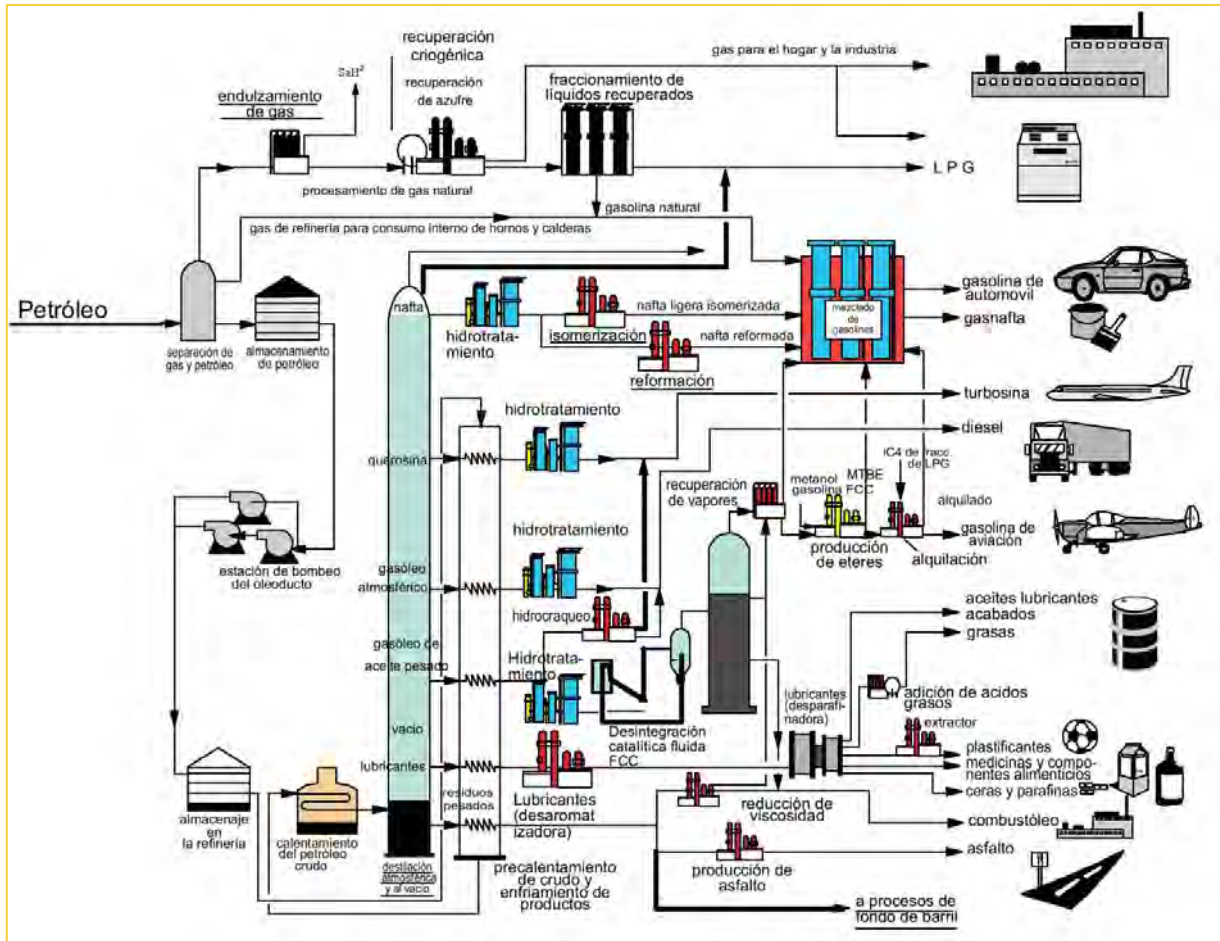


Fig. 4.2: Proceso típico de destilación del petróleo.

4.1.3 Producción y distribución del asfalto en México

Con información del Ingeniero Rafael A. Limón Limón, se puede decir que el primer producto asfáltico elaborado en México es el asfalto Pánuco producido por la compañía el Águila aproximadamente en el año de 1920, con características equivalentes a las de un asfalto AC-10 actual con penetración 85-100. De éste se generó aproximadamente en la década de 1920 a 1930 la gama de productos asfálticos que eran el FM-0, el FM-1 y el FR-3, constituidos principalmente por 60% de cemento asfáltico y un 40% de solventes.

Fue en el tiempo de la Comisión Nacional de Caminos cuando se comenzó la producción de los asfaltos rebajados para la elaboración de tratamientos del terreno a base de riegos superficiales con los cuales se obtenía una superficie de rodamiento inmejorable en aquel tiempo para el tránsito de los vehículos. Además de ser la técnica mexicana iniciadora para los avances camineros.



Fig. 4.3: Hombres trabajando en el riego de un camino. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.

Estos productos llegaron a revolucionar los caminos con la aplicación de mezclas asfálticas en el lugar otorgando por fin a los vehículos una superficie de rodamiento cómoda, segura y probablemente lo más importante para esa época, que fuesen transitables la mayor parte del año, o mejor dicho todo el año.

La producción inicial de los asfaltos en México se encaminó a tres tipos principales que correspondían a los siguientes usos:

- Cemento asfáltico número 6 (CA-6). utilizado en las mezclas asfálticas elaboradas en planta en caliente y también en la fabricación de emulsiones asfálticas.
- Asfalto rebajado de fraguado rápido FR-3. Empleado en las mezclas asfálticas elaboradas en el lugar o al pie de las obras, en riegos de liga y en tratamientos superficiales de protección.

- Asfalto rebajado de fraguado medio FM-1. Que se aplica en los riegos de impregnación para proteger la última capa hidráulica del pavimento.

Los asfaltos rebajados son mezclas de cemento asfáltico con fracciones ligeras obtenidas en la destilación del petróleo llamadas solventes o diluentes. Para procesar el asfalto rebajado de fraguado rápido se mezcla el cemento asfáltico con solventes del tipo nafta o gasolina, mientras que para obtener asfaltos rebajados de fraguado medio el solvente debe de ser similar o igual a la kerosina y los de fraguado lento que su aplicación fue muy baja o nula se mezclaban con aceites ligeros.

Al observar las grandes ventajas que los productos asfálticos proporcionaban en la pavimentación de los caminos, se realizaron muchas investigaciones al respecto obteniendo aproximadamente en el año de 1942 en el estado de Tabasco las primeras emulsiones asfálticas producidas únicamente por empresas particulares, teniendo como base el Cemento Asfáltico producido por PEMEX.

Las emulsiones asfálticas son dispersiones de diminutos glóbulos de asfalto en agua empleando un agente emulsificante que sirva para que el asfalto no repele al agua con la finalidad de fluidificar al cemento asfáltico y hacer aplicaciones en frío, siendo la fase dispersa o interna el asfalto y la fase continua o externa el agua. Las emulsiones se clasifican en aniónicas y catiónicas, dependiendo de la naturaleza del emulsificante.

Las emulsiones aniónicas poseen glóbulos de asfalto con carga eléctrica negativa y son afines a materiales pétreos electropositivos, como la caliza y el basalto. En las emulsiones catiónicas los glóbulos de asfalto presentan carga eléctrica positiva y tienen buena adherencia con los pétreos electronegativos, como los de naturaleza silicosa.

Al tener las emulsiones asfálticas como base de producción al cemento asfáltico no se ha conseguido que tengan buena calidad, pues los cementos asfálticos que distribuye PEMEX en muchas ocasiones tienen calidad inapropiada.

Además en la década de los años 70 Petróleos Mexicanos tenía también dentro de sus especificaciones los asfaltos No.10 y No. 12, y los productos asfálticos FR-1, FR-2, FM-0 y FM-2, pero éstos fueron dados de baja en el año de 1979 por carecer de demanda.

Antes de 1982 los asfaltos producidos en México eran de una calidad satisfactoria, como resultado del empleo de crudos de petróleo de tipo bituminoso del Pánuco. Esta situación tendió a modificarse por la utilización de una mayor variedad de crudos de petróleo también de tipo asfáltico, lo cual se combinó con la

necesidad de fraccionar más la refinación para obtener otros productos de gran demanda y por otra parte, también aumentaron considerablemente los requerimientos de asfalto debido al rápido desarrollo del país.

Lo anterior condujo a que la calidad de los materiales asfálticos a partir de 1982 empezara a tener ciertos problemas que paulatinamente fueron más apreciables, de tal forma que para 1983 una parte de la producción de cemento asfáltico número 6 y de asfalto rebajado FR-3 presentaba características de consistencia, trabajabilidad y susceptibilidad a un envejecimiento prematuro. De tal manera que la calidad de estos asfaltos no permitía asegurar un buen comportamiento de las obras de pavimentación construidas con éstos.

La calidad deficiente de los asfaltos producidos por PEMEX en esos años ocasionó que se formara dentro de la SCT un grupo técnico integrado por representantes de las Direcciones Generales que tienen relación con los materiales asfálticos, para analizar la problemática de su calidad, abastecimiento y distribución, con su consecuente repercusión económica de programación y de servicios de las obras, y por otra parte, para que se estableciera el contacto permanente con las áreas encargadas de la producción de asfaltos de PEMEX, a fin de promover el establecimiento de procedimientos que propiciaran el mejoramiento de los asfaltos en los aspectos señalados. Por su parte PEMEX programó lo necesario para mejorar sustancialmente la calidad de los asfaltos.

Dentro de las primeras acciones que se realizaron fue la utilización de residuos de la destilación del petróleo provenientes de las torres de alto vacío, dejando para otros usos los residuos de las desasfaltadoras que generalmente no resultan adecuados para producir buenos asfaltos, También se construyó una nueva planta de procesamiento de asfaltos en la refinería de Salamanca y se incrementó la eficiencia en los procedimientos de control y verificación de la calidad en la producción de asfaltos.

Como consecuencia de las labores de mejoramiento de la calidad y de la buena coordinación entre PEMEX y la SCT, para el año de 1985 la calidad del cemento asfáltico número 6 y del asfalto rebajado FR-3 aumentó en forma significativa. Con estos resultados se obtuvo un aumento muy importante en el índice de servicio de los pavimentos.

La demanda nacional de asfalto que se ha generado en el transcurso de los años y que fue cubierta por Petróleos Mexicanos es la siguiente:

En 1985 la demanda fue de 1'330,000 toneladas equivalentes a 8.4 millones de barriles por año, que equivale al 4% del fabricado en Norteamérica. De los 8.4 millones de barriles anuales de asfalto, 5.3 millones correspondieron al producto

que PEMEX comercializó como cemento asfáltico número 6 y que corresponde a un producto con características muy cercanas al producto que en Norteamérica se identifica como Asphaltic Cement # 20 o AC-20. Y los 2.3 millones de barriles restantes, correspondieron a asfaltos rebajados que PEMEX designa como FR3 y FM1. Productos elaborados en las dos plantas de producción y distribución que forman parte de las refinerías ubicadas en Salamanca, Guanajuato y en Ciudad Madero, Tamaulipas.

Las emulsiones asfálticas han sido una buena solución para enfrentar problemas de construcción de mezclas asfálticas tanto en planta como en el lugar, para los frentes de trabajo en los que influyen en forma preponderante condiciones climáticas especialmente húmedas o bien características particulares de los materiales pétreos de algunas regiones del país. Alrededor del año 1987, la mayor parte de las emulsiones asfálticas que se emplearon en México fueron producidas por el organismo federal denominado Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CPFISC), quien a través de dos plantas de producción que tenía instaladas; una en Irapuato Guanajuato, y otra en Estación Chontalpa, Tabasco, satisfaciendo las necesidades que en aquel momento se presentaban de este producto.

Existían también ya plantas particulares de producción de emulsiones asfálticas, cuyos volúmenes de producto eran muy reducidos y operaban el suministro principalmente en las regiones del norte y el sureste del País.

Hacia el año de 1987 se tenía un gran problema en la distribución de los productos asfálticos pues al solo disponer de dos centros de distribución se tiene un incremento en los costos de las obras relacionado con el costo de los acarreos del asfalto, además de los problemas que esto implica para el debido cumplimiento de los programas de obra. Para contrarrestar este efecto se realizaron estudios de factibilidad económica con objeto de definir otros centros de producción y distribución de asfaltos, además de Ciudad Madero y Salamanca.

En principio se pensó que las refinerías de PEMEX establecidas en Minatitlán, Veracruz, Salina Cruz Oaxaca, Cadereyta, Nuevo León y Tula Hidalgo, podrían ser habilitadas para el procesamiento y distribución de asfaltos, siendo la alternativa que presentó mejores posibilidades la que incluye a Minatitlán y Cadereyta.

En México, el primer cemento asfáltico AC-20 se produjo en Septiembre de 1995 en las refinerías de Ciudad Madero, Tamaulipas y Cadereyta, Nuevo León, en junio de 1996 en la de Salina Cruz, Oaxaca, para julio del mismo año se realizó el cambio de Cemento No.6 a AC-20 en Tula, Hidalgo y fue hasta septiembre de

1996 que se inició la producción de éste en Salamanca Guanajuato. También se elabora en esta última fecha dentro de la refinería de Ciudad Madero Tamaulipas el cemento asfáltico AC-30 que básicamente su consumo estuvo destinado para exportación principalmente para los Estados Unidos de América. Hablando del AC-5 se sabe que se comenzó a producir a partir de febrero de 1998 únicamente en Salamanca Guanajuato y utilizado para la fabricación de emulsiones.

Queda una incógnita: ¿por qué el cambio de cemento asfáltico clasificado por penetración al clasificado por viscosidad? El cemento asfáltico fue aplicable a los requerimientos de uso de la mayor parte del país, sin embargo en México existe una gran diversidad de regiones con una gran diferencia en sus características como el clima, materiales, procedimientos constructivos y el tránsito, que requieren de un cemento asfáltico adecuado para cada una de ellas. Gran parte del asfalto producido en México es para fines de exportación cuya demanda principal proviene de los Estados Unidos de América, exigiendo el cumplimiento de las normas ASTM 1992 grado viscosidad. Así comenzó la necesidad de unificar la producción de los cementos asfálticos con una sola clasificación y obviamente no fue por penetración.

Con la introducción de la clasificación del asfalto por viscosidad, también se hizo evidente la disminución del empleo de asfaltos rebajados y sustituyéndolos por emulsiones asfálticas. Los principales motivos fueron; el desperdicio de los recursos no renovables utilizados como solventes, los cuales cuando quedan atrapados en la mezcla en cantidades muy grandes originan la inestabilidad de la misma; La reducción en la calidad de las mezclas asfálticas elaboradas con este procedimiento al quedar expuesta a los efectos perjudiciales del medio ambiente, que también al mismo tiempo recibe la inducción de contaminantes no controlables, originando un impacto ambiental negativo, además de mejorar la adherencia entre el pétreo y el asfalto.

En 1996 la Subsecretaría de Infraestructura de la Dirección General de Servicios Técnicos, SCT publicó la *guía general tentativa para el uso de los nuevos asfaltos que produce PEMEX*. Donde se dan las siguientes recomendaciones:

- El asfalto AC 5 Se usará para la elaboración de emulsiones asfálticas en general y para concretos asfálticos que se utilicen en algunas partes de la Sierra Madre Occidental comprendidas en los estados de Durango y Chihuahua.
- El asfalto AC 10 – equivalente al cemento número 6 – se empleará en la región central y altiplano de la República.

- El asfalto AC 20 para el suroeste de la República y las regiones costeras del Golfo y del Pacífico, hasta el estado de Sinaloa, incluyendo también Baja California Sur.
- El asfalto AC 30 para su uso en la región Norte y Noroeste del país, excluido el estado de Tamaulipas.

La distribución anterior se basa simplemente en condiciones climáticas, por lo que deben tomarse en cuenta adicionalmente las siguientes recomendaciones:

- Utilizar procedimientos constructivos adecuados en lo que se refiere especialmente al mezclado, tendido y compactación de las capas asfálticas, aplicando también las temperaturas apropiadas a la viscosidad de los asfaltos.
- Prever el uso de cementos asfálticos modificados con algún aditivo, cuando las condiciones propias de la obra así lo ameriten.
- Llevar a cabo una evaluación y seguimiento cuidadoso sobre el comportamiento de las obras de pavimentación que se construyan con los nuevos cementos asfálticos, al fin de ir formando la experiencia mexicana, que incluya las condiciones reales de nuestro medio y que permita en el futuro próximo tomar decisiones cada vez más acertadas relativas a la ejecución de este tipo de obras.

En esta publicación, también se mencionan las aplicaciones de los nuevos cementos asfálticos y de las emulsiones asfálticas para esa fecha:

- Cementos asfálticos (solos o modificados). Se usarán para concretos asfálticos en las regiones antes señaladas y para carreteras de alta circulación (en intensidad de tránsito y cargas por eje).
- Emulsiones asfálticas catiónicas de fraguado lento o superestable. Para su uso en riegos de impregnación de bases hidráulicas.
- Emulsiones asfálticas catiónicas de fraguado rápido. Se usarán en riegos de liga, carpetas asfálticas de riegos superficiales y riegos de sello convencionales.
- Emulsiones asfálticas catiónicas de fraguado medio o lento. Para su uso en carpetas asfálticas de mezclas en planta, en frío y para carreteras con tránsito máximo de 2000 vehículos diarios y 20% de pesados, incluyendo trabajos de conservación como bacheos, renivelaciones y sobrecarpetas.

La calidad dentro de PEMEX se revisa mediante el seguimiento y aplicación de los procedimientos descritos por las entidades de estandarización del Instituto del

Asfalto y el método ASTM, ambas norteamericanas, y las necesidades que el cliente requiere.

Pero siendo la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) la institución que más experiencia tiene en México sobre la utilización de los materiales asfálticos para pavimentación, ha desarrollado su propia tecnología y fijado las normas de calidad para la clasificación y manejo de los asfaltos que utiliza.

Se instalaron laboratorios de la SCT cerca de las refinerías de PEMEX en Ciudad Madero y Salamanca, los cuales tienen la función de verificar la calidad de la producción que se destina para la ejecución de las obras de esa dependencia.

La calidad de los asfaltos se define a través de un conjunto de resultados que indican cada uno de ellos una propiedad, un trabajo de control de calidad es aquel que pone énfasis en ciertas características que tienen influencia significativa en el manejo, aplicación y comportamiento durante el servicio de las obras viales.

Para 1999, según una publicación del ingeniero Juan E. Ramos Medina, se tenía conocimiento que PEMEX en sus exportaciones de cementos asfálticos a los Estados Unidos, ya se encontraba reportando resultados con clasificación tipo AC (base viscosidad) y tipo PG (grado de desempeño), para identificación del mismo producto. Lo que da a entender que desde 1999 a la fecha nos encontramos en un momento de transición, similar al ocasionado en el cambio de cemento asfáltico base penetración al base viscosidad, en donde se han realizado diversas investigaciones al respecto para tener la experiencia mexicana en el manejo de los asfaltos grado PG.

Actualmente, en México prácticamente todo el asfalto que consumimos proviene del petróleo y su proceso de refinación llevado a cabo por la dependencia federal denominada Petróleos Mexicanos (PEMEX).

Es evidente que en las obras de pavimentación es muy importante seleccionar el tipo y la calidad apropiada del asfalto para alcanzar los objetivos de un servicio efectivo, buen comportamiento y larga duración.

Ahora bien la clasificación del asfalto en México siempre ha venido influenciada por la existente en Estados Unidos de América, en parte por la exportación de los productos asfálticos hacia el país vecino y también en ocasiones por que es en ese país en donde se genera la mayor información técnica al respecto y en caso de no seguir estos pasos quedaríamos obsoletos, pues la investigación referente a los asfaltos en nuestro país ha sido muy poca, hasta los últimos años (año 2000 en adelante) se ha visto un avance importante

en el desarrollo de técnicas para emplear los productos asfálticos, gracias al interés de empresas y asociaciones público y privadas para el desarrollo de investigaciones.

Se puede señalar que al asfalto se le determinan dos tipos principales de características, aquellas que proporcionan información sobre el manejo del producto y las que indican el desempeño que tendrá el asfalto al ser aplicado. Por lo general las primeras no han cambiado representativamente mientras que las segundas han tenido variaciones considerables a lo largo del tiempo y proporcionan información para clasificar a los asfaltos.

Pruebas para determinar las características del asfalto para su manejo:

- Determinación del punto de ignición. El punto de ignición de un producto asfáltico representa la temperatura crítica arriba de la cual deberán tomarse precauciones para eliminar los peligros de incendio durante el calentamiento y manipulación del mismo. Este parámetro se obtiene con la prueba de copa abierta de Cleveland.
- Determinación del punto de reblandecimiento (punto de fusión). El reblandecimiento de un cemento asfáltico no tiene lugar a una temperatura definida, sino que a medida que aumenta la temperatura se va reblandeciendo gradualmente hasta alcanzar la fluidez de un líquido. Esta característica se determina con el procedimiento determinado anillo – esfera.

Desde hace tiempo, se ha tenido el problema de definir y de tener una buena selección de métodos de ensaye, que aseguren la calidad de un ligante asfáltico para un pavimento que garantice durabilidad y resistencia a las cargas, temperaturas, tránsito y envejecimiento.

Considerando en tiempo, desarrollo así como en origen de las especificaciones de los asfaltos para pavimentos se tienen dos etapas en las cuales, en la primera se tenía un número pequeño de pruebas: penetración, punto de encendido, viscosidad Saybolt, ductilidad y el punto de reblandecimiento, se consideraba como suficiente para las condiciones de la época dado que se tenían asfaltos muy conocidos como eran los de Texas, California, México y Venezuela siendo su comportamiento en las condiciones de tránsito, envejecimiento, cargas, etc., satisfactorio, pero posteriormente empezaron a tenerse más fuentes de abastecimiento de crudos, sistemas más sofisticados de refinación, así como un mayor requerimiento estructural de las capas de pavimentos asfálticos, lo que se tradujo en que aquellos métodos de laboratorio ya no eran los adecuados y se

buscaron otros métodos de control de calidad para poder clasificarlos y tratar de adecuar su uso.

Los métodos de ensaye que se incorporaron fueron los de fragilidad FRASS, viscosidad absoluta, cinemática y brookfield, así como las de película delgada como fue primero el de TFOT y posteriormente el de RTFOT, que además de determinar una pérdida por calentamiento equivalente a los procesos de elaboración de los pavimentos, se pudieran efectuar ensayos después para compararlos.

Con lo anteriormente mencionado y las nuevas pruebas que se incorporaron, se hace más fácil la caracterización de un asfalto, pero se seguía adoleciendo de tener una compatibilidad entre los resultados de laboratorio y el comportamiento real del asfalto en la obra.

4.1.4 Cementos asfálticos clasificados por penetración.

Las especificaciones para los asfaltos clasificados por penetración se basan en pruebas empíricas y no son adecuadas para representar información real en el intervalo de temperaturas del pavimento ni simular las condiciones de carga y ambientales a las que el asfalto estará sujeto.

La primera clasificación de los asfaltos de la que se tiene información en México es la documentada en las Especificaciones de Caminos de la Dirección Nacional de Caminos perteneciente a la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, en el año de 1947. Sin embargo es una copia de la clasificación según el Instituto del Asfalto (Asphalt Institute). Esta clasificación se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Requisitos de calidad para el Asfalto 15-200. Fuente: Especificaciones de Caminos, Dirección Nacional de Caminos de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1947.

Característica	Valor
Penetración a 25°C.	150 a 200
Pérdida de peso máximo.	3%
Penetración del residuo a 25°C.	75 a 100%
Solubilidad en S2. C.	99%
Solubilidad en Cl4. C.	98.50%
Ductilidad a 25°C., mínima.	35 cm

Más adelante en el año de 1957 se propuso otra normativa que también clasificaba al asfalto según su penetración que podemos interpretar como grado de dureza de un cemento asfáltico.

Tabla 4.2: Requisitos de calidad para los tipos de Cementos Asfálticos que se producían en México para el año de 1957. Fuente: Especificaciones Generales de Construcción, Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1957.

Característica	Cemento Asfáltico			
	Núm. 3	Núm. 6	Núm. 7	Núm. 8
Penetración, 100g, 5s, 25°C, grados	180-200	80-100	60-70	40-50
Viscosidad Saybolt-Furol: A 135°C, s, mínimo	60	85	100	120
Punto de inflamación (copa abierta de Cleaveland), °C, mínimo	220	232	232	232
Punto de reblandecimiento, °C	37-43	45-52	48-56	52-60
Ductilidad, 25°C, cm, mínimo	60	100	100	100
Solubilidad en tetracloruro de carbono, por ciento, mínimo	99.5	99.5	99.5	99.5
Prueba de la película delgada, 50 cm³, 5h, 163°C:				
Penetración retenida, por ciento, mínimo	40	50	54	58
Pérdida por calentamiento, por ciento, máximo	1.4	1	0.8	0.8

En la norma de 1981 se describe la prueba perdida por calentamiento de cementos asfálticos la cual se realiza al obtener la película delgada. Que consiste en colocar en una capsula 50g de cemento asfáltico y mantenerla en el horno a temperatura constante de 163°C durante un periodo de 5 h, para después girar en un dispositivo a velocidad de 6 revoluciones por minuto. La diferencia entre el peso inicial y el final da como resultado la perdida por calentamiento del asfalto.

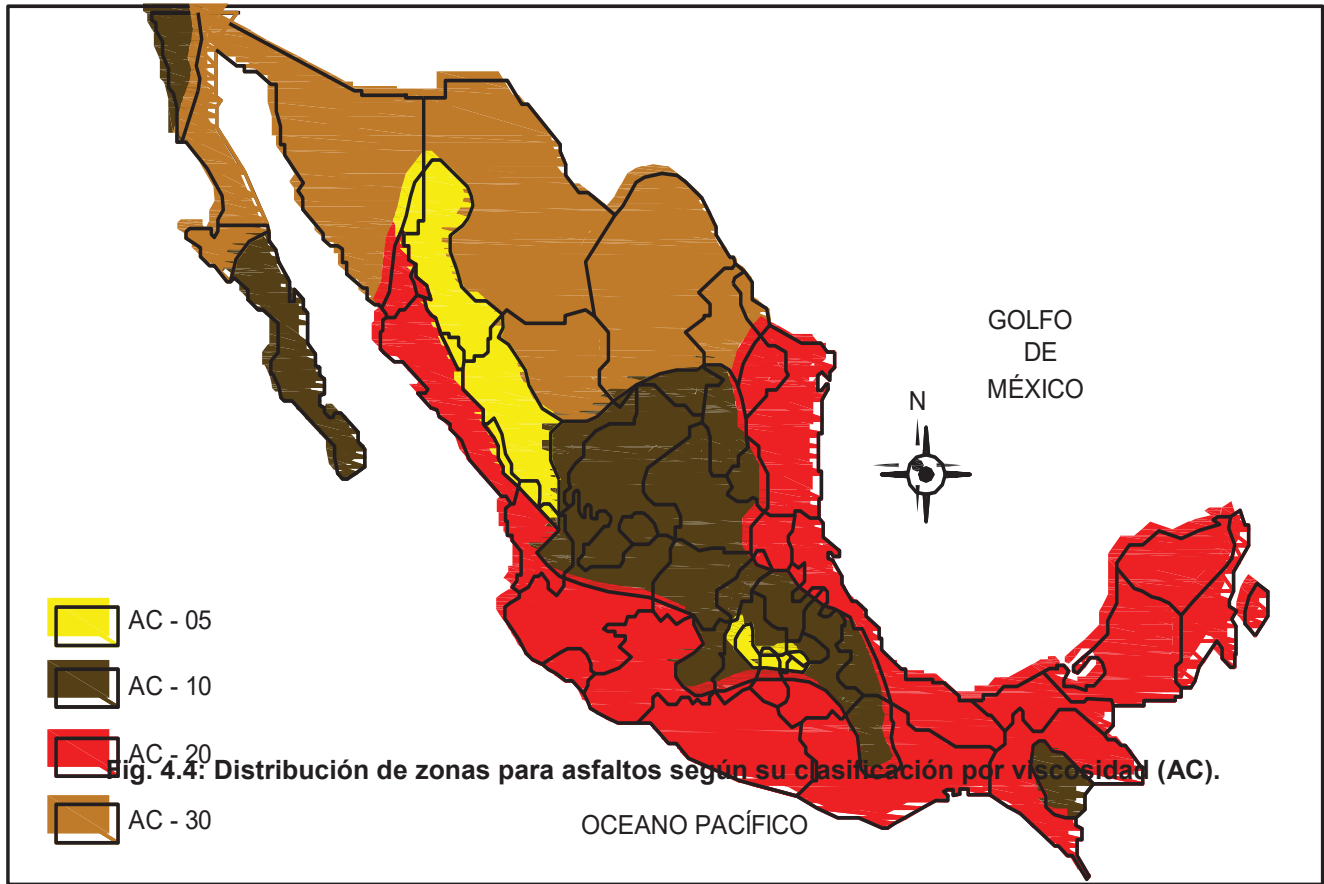
Tabla 4.3: Requisitos de calidad SCT para los tipos de asfalto que se producían en México y su comparación con las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) para el año de 1987.

Característica	Producto Asfáltico					
	Cemento Asfáltico Núm. 6 (SCT)	Cemento Asfáltico 85-100 (ASTM)	Asfalto Rebajado FR-3 (SCT)	Asfalto Liquido RC-800 (ASTM)	Asfalto Rebajado FM-1 (SCT)	Asfalto Liquido MC-70 (ASTM)
Penetración, 100g, 5s, 25°C, grados	80-100	85-100	80-120	80-120	120-300	125-250
Viscosidad Saybolt-Furol, s, mínimo	85	-	250-500	(400-800)*	75-150	(35-70)*
Punto de inflamación, °C, mínimo	232	232	27	27	38	38
Punto de reblandecimiento, °C	45-52	45-52	-	-	-	-
Ductilidad, 25°C, cm, mínimo	100	100	100	100	100	100
Solubilidad en tetracloruro de carbono, por ciento, mínimo	99.5	99.0	99.5	99.0	99.5	99.0
Prueba de la película delgada, 50 cm³, 5h, 163°C:						
Penetración retenida, por ciento, mínimo	50	47	-	-	-	-
Pérdida por calentamiento, por ciento, máximo	1	1	-	-	-	-
Ductilidad después de la pérdida por calentamiento, mínimo	-	75	-	-	-	-
Destilación: Por ciento del total destilado a 360°C						
Hasta 190°C mínimo	-	-	-	-	-	-
Hasta 225°C mínimo	-	-	25	15	Máx. 20	Máx. 20
Hasta 260°C mínimo	-	-	55	45	25-65	20-60
Hasta 315°C mínimo	-	-	83	75	70-90	65-90
Residuo de la destilación a 360°C, por ciento, mínimo	-	-	73	75	60	55
Agua por destilación, por ciento, máximo	-	-	0.2	0.2	0.2	0.2
* Valores reales en centistokes, convertidos a segundos Saybolt-Furol.						

La normativa aplicable, en este caso las Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas de 1957 hacen obligatorio el emplear las temperaturas indicadas para realizar la mezcla agregado pétreo – asfalto, siendo para los cementos asfálticos Núm. 3, Núm. 6, Núm. 7 y Núm. 8 de 120°C a 160°C. Ya que en caso de tener menores temperaturas se complica el mezclado, en caso contrario se tendrá un sobrecalentamiento en el asfalto y podría presentarse un aumento en el envejecimiento.

4.1.5 Cementos Asfálticos clasificados por viscosidad.

Esta clasificación se aplica en Estados Unidos por la ASTM desde 1992 y en México su aplicación comenzó en 1996 por parte de PEMEX con la finalidad de garantizar de manera adecuada la calidad del cemento asfáltico, pero también para unificar la producción de éste pues gran parte de la producción Nacional se exporta a los Estados Unidos. Consiste en tomar como parámetro principal para la identificación del producto su viscosidad, pues se considera que explica mejor el manejo y aplicación del asfalto en obra que la penetración.



4.1.6 Cementos asfálticos clasificados por grado de desempeño (ligantes asfálticos con metodología SHRP). (Fuente: SHRP (SUPERPAVE), Rafael Limón 1998).

El tipo de clasificación por grado de desempeño PG por sus siglas en inglés *Performance Grade* es nuevo en México pero su origen data desde 1987 cuando en Estados Unidos se desarrolló el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras, SHRP por sus siglas en inglés Strategic Highway Research Program para mejorar el desempeño, durabilidad y seguridad de las carreteras. El punto principal de este programa fue el obtener una clasificación de los asfaltos que los caracterice en función de las temperaturas, el nivel de tránsito y envejecimiento al que se encontrará sometido.

En el rango de altas temperaturas de servicio se tiene la viscosidad capilar absoluta a 60°C, la cual no es adecuada para algunos tipos de asfalto y no sirve para asfaltos envejecidos ni modificados con polímeros.

Actualmente no existen ensayos confiables que puedan fijar parámetros para clasificar el asfalto a bajas temperaturas.

El único método que se supone que evalúa las características internas del asfalto es el de la ductilidad, el cual tiene limitaciones ya que varía de un ensayo a otro, su valor es dudoso y no tiene relación con el comportamiento de una mezcla asfáltica a corto y largo plazo.

No existía una prueba que nos indicara el comportamiento a largo plazo del asfalto, sino únicamente en su etapa inicial, las únicas opciones para medir la susceptibilidad térmica de los asfaltos es mediante el índice de penetración o el coeficiente logarítmico de temperatura, pero no determinan el comportamiento a largo plazo. Por lo anterior y dado que los asfaltos cada vez tienen menor durabilidad, así como las mezclas asfálticas y otros materiales, se implementó el programa SHRP para seleccionar en el caso que nos ocupa, asfaltos idóneos para cada lugar de acuerdo a las condiciones y la disponibilidad de los mismos ya sean naturales o modificados. Para lograr el objetivo se sugirió el siguiente programa:

- Determinar las propiedades fundamentales de los asfaltos, las causas de falla de estos y de las mezclas asfálticas.
- Identificar por regiones las temperaturas máximas y mínimas de diseño a las que estarán sujetos los pavimentos.
- Correlacionar las fallas de los pavimentos y las propiedades de los asfaltos.
- Determinar las cargas en peso, intensidad y los tiempos en que estas actúan en los pavimentos.
- Selección de los métodos de ensaye adecuados que midan realmente las propiedades al asfalto, así como su comportamiento en el campo.
- Seleccionar pruebas que puedan sustituir a otros cuando sea necesario, por normas y disponibilidades de equipo.
- Determinar que las nuevas especificaciones, puedan ser correlacionadas con las fallas de los pavimentos flexibles, medidos bajo las condiciones de tránsito y de lugar donde son colocados.

Fue hasta el año de 1993 que se llegó a la determinación de esta clasificación publicada junto con el método de diseño SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements). Con el cual se trata primordialmente de evitar las deformaciones por roderas y las grietas por fatiga y/o temperatura en los pavimentos asfálticos.

- *Concepto de las especificaciones para cementos asfálticos de SHRP.*

Determinar mediante un estudio en el que se consideren todas las fallas de los pavimentos y su relación con las propiedades físicas de los asfaltos para poder tener un parámetro; y con este determinar qué valores límite pueden ser fijados a dichas propiedades.

Los mecanismos de falla, que preocupan en las mezclas asfálticas de un pavimento están referidos a lo siguiente:

- Grietas o fisuras por contracciones de baja temperatura.
- Grietas por fatiga debido a las cargas dinámicas en intensidad y tipo de carga.
- Deformación plástica en las capas asfálticas “Roderas” por falta de capacidad estructural o altas temperaturas de pavimento.
- Envejecimiento prematuro del asfalto debido a la acción de los agentes atmosféricos junto con la calidad propia del asfalto.
- Daños por la presencia de humedad en el asfalto, debido a lluvias, congelamiento, humedad ambiente, etc. Pero este concepto se dejó para su análisis en el capítulo de mezclas asfálticas, ya que estos daños son resultantes de la inter-relación del agregado-asfalto.

Climatología: Las condiciones ambientales y del lugar donde se coloca el pavimento, tienen una gran influencia en la temperatura a que van a trabajar los pavimentos asfálticos y esto redundará en la resistencia que ofrecen durante su vida de servicio por lo que se consideró que era necesario incorporarlo dentro de las normas SHRP. Para esto se recomendó la temperatura mínima de un día de pavimento para seleccionar un asfalto que resista a la fractura o rigidez "Thermal Cracking". La temperatura máxima y el promedio de los siete días seguidos de máxima temperatura durante el año para evitar deformaciones permanentes. El problema surgía en que se obtenía la temperatura del aire más no así la del pavimento; sin embargo puede ser transformado a temperaturas máximas y mínimas, mediante fórmulas matemáticas.

- *Diferencia entre temperatura del pavimento y temperatura del aire.*

El sistema que se siguió para esto fue el siguiente:

Para el caso de la temperatura mínima, se tomó durante un promedio de 30 años de cada lugar, cada año la más baja y se determinó la media de todas las más bajas temperaturas, la desviación estándar de ellas y el número de años, con esto se llegó a la fórmula siguiente para determinar la temperatura más baja del pavimento en la superficie.

$$T \text{ mín.} = 0.859 T \text{ aire} + 1.7$$

Donde:

T mín. = Temperatura mínima del pavimento en °C.

T aire = temperatura mínima del aire en los últimos 30 años en un día.

Para la temperatura máxima del pavimento que esta inter-relacionada con las deformaciones permanentes del pavimento, se tomó el dato de cada año de los últimos 30 años o los disponibles, en los cuales se determinó los 7 días más calurosos de cada año, calculando en forma progresiva y el primer día puede ser cambiado por otro día de máxima temperatura y que se agrega al final seleccionando el más alto promedio de los últimos 30 años de los registros existentes, para determinar la temperatura máxima del pavimento se considera a una profundidad de 20 mm de su superficie y se determina por la siguiente fórmula:

$$T \text{ 20 mm} = (T \text{ aire} - 0.0618 \text{ Lat}^2 + 0.2, 289\text{lat} + 42.2) (0.9545) - 17.78$$

Donde:

T 20 mm = Temperatura máxima de diseño a una profundidad de 20 mm.

T aire = Promedio de 7 días de temperatura máxima del aire máximo.

Lat. = Latitud geográfica del lugar en grados.

Una parte importante de la determinación del grado de desempeño es la reología - ciencia de deformación y flujo de materiales bajo una fuerza externa- que mediante los conceptos de rigidez propuesta por Robert Hooke y la fluidez de Isaac Newton se obtienen el módulo de corte y el ángulo de fase para con estos elementos determinar el grado de desempeño, PG.

➤ *Reología.*

La mayoría de las pruebas aceptadas y normadas por SHRP, están basadas en la reología por lo se dará una breve explicación de la misma.

Reología es la ciencia de la deformación y el fluir de la materia, por lo que cualquier material sometido a un esfuerzo cortante suficiente es capaz de deformarse y fluir.

La mecánica racional considera los cuerpos como indeformables y la mecánica elástica los asimila a sólidos elásticos, de acuerdo a la ley de Hooke.

La reología considera el caso en que las deformaciones producidas por un agente exterior están íntimamente ligadas al factor tiempo.

Los asfaltos por ser sistemas coloidales tienen propiedades reológicas especiales, por lo que se adaptan a una gran variedad de usos. Al conocer dichas propiedades hace posible una correcta clasificación, así como poder elegir el material más adecuado.

El comportamiento reológico de un material está sujeto a las variables: temperatura, presión, tiempo, esfuerzo cortante y velocidad de deformación. Al determinar los índices reológicos, podemos tener las tres primeras como constantes y obtener unos diagramas denominados "Curvas de Consistencia", que representa el gradiente de velocidad en función del esfuerzo cortante, que hace fluir el material a la velocidad del gradiente.

Cuando un fluido se somete a la acción de una fuerza se deforma y fluye, una parte de la energía se transforma en energía cinemática "almacenada", y otra parte más o menos grande se disipa en forma de energía calorífica siendo esta la que determina la viscosidad, la cual varía de acuerdo a la energía disipada.

Newton definió el concepto de viscosidad y su hipótesis, en que un líquido en movimiento que se desliza a una velocidad constante ejerce una fuerza " f " sobre otro situado a una distancia " δy " cuya velocidad difiere en " δv ", por lo que se tiene la ecuación:

—

Siendo:

η = Constante de fluido en movimiento.

S = Superficie de las capas.

η = Constante de fluido en movimiento que es la fuerza necesaria por unidad de área para mantener la diferencia de velocidad.

Inversa de la η se llama fluidez y se representa por ϕ .

Donde: —

El incremento de la velocidad " δv " de un plano respecto a otro situado a la distancia " δy " medido perpendicularmente a la dirección de velocidad $\delta v / \delta y$ se le denomina "Gradiente de velocidad y se le denomina y se le identifica como la velocidad de deformación angular de y/dt .

Los fluidos donde existe una relación proporcional entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad D , se les denomina líquidos newtonianos y se representa por una recta en el diagrama, este comportamiento es común en algunos asfaltos de la zona de Panuco en México.

Por lo general la mayoría de los asfaltos son líquidos no newtonianos que por no ser fluidos muestran variaciones en la viscosidad y su comportamiento es entre un líquido y un sólido, requiriéndose un esfuerzo cortante crítico para que empiece a fluir llamado límite de fluencia, por lo que abajo de este valor se comporta como sólido y arriba como líquido. Su ecuación es la siguiente:

—

Por lo que un material plástico tiene dos constantes independientes, la viscosidad que da propiedades newtonianas de líquidos y el límite de fluencia que nos determina la carga máxima que puede soportar sin que se produzcan deformaciones con velocidad constante y se denominan plásticos o binghamianos.

Existen otros tipos de fluidos denominados pseudoplásticos al cual pertenecen los asfaltos modificados los cuales tienen un límite de fluencia no medible y su gradiente de velocidad no es directamente proporcional a la tensión aplicada, sino que crece más rápidamente y sus variables están regidas por una ecuación más compleja y dentro de este comportamiento se encuentran los asfaltos sopladados, modificados, recuperados y algunos asfaltos después de la prueba de envejecimiento en la película delgada, transformándose los comportamientos newtonianos en pseudoplásticos.

La realidad es que los materiales pseudoplásticos ocupan una posición intermedia entre los newtonianos y los plásticos.

A= Líquido Newtoniano

B= Fluido Pseudoplástico

C= Fluido Plástico

Por otra parte al tratar de representar la visco-elasticidad como una relación podemos tener las siguientes condiciones:

Donde:

G' = Componente de viscosidad (energía disipada)

G'' = Componente Elástico (energía almacenada)

δ = Ángulo Fase

G^* = Módulo complejo SHRP

$G^*/\sin \delta$ = Módulo Complejo SHRP entre seno δ

$G^*\sin \delta$ = Módulo Complejo SHRP por seno δ

Estos son los parámetros para la prueba de reología de corte directo.

➤ *Ensayes seleccionados por SHRP para cementos asfálticos.*

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, el desarrollo de nuevas especificaciones, que estuvieran relacionadas con el comportamiento de los asfaltos en la obra, requiere de la selección de las propiedades físicas del asfalto que están estrechamente vinculadas con las formas de falla de un pavimento, de acuerdo a los principios de ingeniería.

Los ensayos seleccionados miden las propiedades reológicas a altas temperaturas como son las de elaboración de la mezcla asfáltica en las etapas de calentamiento, bombeo, mezclado, tendido y compactación, a altas temperaturas de servicio en la obra, como temperaturas intermedias y bajas, para que pueda ser homologado a los requerimientos necesarios.

Tabla 4.4: Ensayes utilizados por SHRP para cementos asfálticos

Prueba	Característica a determinar	Norma	
Punto de encendido "SP"	Temperatura de Riesgo	ASTM D-9290	AASHTO T-48
Viscosidad coaxial rotacional Coaxial Brookfield" V.B."	Viscosidad a altas temperaturas	ASTM D-4402	AASHTO TP-48
Reómetro de corte dinámico "DSR"	G^* y δ a altas y medias temperaturas	SHRP B-003	AASHTO TP-5
Envejecimiento en película delgada rolada "RTFOT"	Envejecimiento a corto plazo	ASTM D-2872	AASHTO T-240
Envejecimiento en el molde de presión "PAV"	Envejecimiento a largo plazo	SHRP D-005	AASHTO PP-1
Ensayo de tensión directa "DTT"	Deformación a la ruptura por tensión a baja temperatura	SHRP B-006	AASHTO TP-7
Reómetro de flexión por viga de apoyos "BSR"	$S(t)$ y m a baja temperatura	SHRP B-002	AASHTO TP-1

a) Reómetro de corte dinámico (DSR).

Este equipo permite medir el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) a diferentes temperaturas y tiempos de esfuerzo, expresando a este último en radianes por segundo. Como los esfuerzos responsables de la deformación plástica del asfalto son los de corte, la reología en corte simple es la técnica más adecuada para prevenir deformaciones permanentes del ligante. La muestra de asfalto es colocada entre dos placas paralelas con espesor de 2 mm. Y diámetro de 25 mm para altas temperaturas o espesor de 1 mm y diámetro de 8 mm para

temperaturas intermedias. Se aplica una frecuencia de oscilación de 10 radianes/segundo (1.59 Hz).

b) Viscosidad coaxial rotacional (RV).

Se utiliza para dos fines: asegurar que el ligante asfáltico es suficientemente fluido para ser transportado, bombeado y mezclado; y para construir la curva viscosidad-temperatura. Se ha especificado el viscosímetro rotacional Brookfield con sistema Thermosel de acuerdo con la norma ASTM D-4420. Se mide la viscosidad a temperaturas entre 80 y 180°C dependiendo del tipo de asfalto.

c) Reómetro de flexión (BBR).

Por primera vez en la historia de las especificaciones de asfaltos se está en condiciones de medir las propiedades de los mismos a las temperaturas mínimas del pavimento. Este es un ensayo de deformación por flujo plástico a bajas temperaturas que muestra como el asfalto se deforma bajo una carga constante permitiendo medir la rigidez del mismo y el valor de la pendiente a los 60 segundos de carga. Esta rigidez en la deformación por flujo plástico a flexión, permitirá determinar si el asfalto puede resistir fisuramiento térmico a bajas temperaturas y está relacionado con el concepto de "límite de rigidez por temperatura", que es la temperatura del pavimento a la cual un dado valor de la rigidez, es alcanzada por el asfalto a un especificado tiempo carga.

d) Ensayo de tensión directa.

El ensayo de tensión directa mide la deformación de rotura a temperaturas bajo cero donde el asfalto exhibe comportamiento frágil. El ensayo se realiza sobre muestras de asfalto que han sido sometidas a envejecimiento de corto y largo plazo. Este ensayo fue desarrollado como complemento del BBR dado que en algunos casos, particularmente con asfaltos modificados con polímeros, a pesar de tener un alto valor de rigidez, el ligante puede aún ser estirado o deformado sin rotura. Para estos casos SHRP diseñó DTT a fin de poder evaluar si el asfalto a pesar de tener un alto $S(t)$ muestra un comportamiento razonablemente dúctil a bajas temperaturas. El equipo posee algunas características particulares, dado que las deformaciones a medir son extremadamente pequeñas y el control de temperaturas bajo cero debe ser estricto.

e) Envejecimiento a largo plazo a presión y temperatura (PAV).

El envejecimiento que sufre el asfalto durante su vida útil en el pavimento es tomado en cuenta por primera vez en una especificación de asfaltos. Este equipo utiliza aire comprimido a alta presión (2070 KPa) y altas temperaturas (90, 100 o 110°C) de manera de poder simular el envejecimiento a largo plazo (5 años) en tan solo 20 hrs de ensayo. Se utilizan muestras de asfalto previamente envejecidas con el RTFOT, las cuales se colocan en 10 recipientes que a su vez se colocan dentro de una vasija de acero inoxidable. La temperatura de ensayo varía según el clima de la región, la mayoría de las cuales admite 100°C. El ensayo simula entre 5 y 10 años de envejecimiento en el campo.

- *Especificaciones para asfaltos clasificados según su grado de desempeño (PG) con metodología SHRP.*

Deformaciones permanentes

Este tipo de falla del pavimento es crítica a altas temperaturas de servicio y es causada por la acumulación de deformaciones plásticas en la mezcla que resulta de la aplicación repetida de cargas del tránsito. Las propiedades de ligante asfáltico junto con los agregados y las características de las mezclas juegan un rol importante en la resistencia a la formación de roderas.

Basados a estas observaciones, en medidas de la deformación no recuperable del asfalto a altas temperaturas de servicio y para tiempos de carga correspondientes con el tránsito y la correlación de esta con la deformación permanente en mezclas asfálticas, se determinó un parámetro cuyo valor es el módulo complejo G^* y el denominador es el seno del ángulo de fase δ esto es $G^*/\sin \delta$ que es la inversa del componente perdido en la deformación ($1/G''$).

Este parámetro es medido a la temperatura máxima esperada del pavimento y a una frecuencia de 1.59 Hz, que corresponde a 10 radianes/segundo que se relaciona con el tiempo de carga que resulta de un camión viajando a la velocidad de 80 km/h (50mph).

El límite para el asfalto original fue establecido a fin de evitar deformación permanente prematura debido a lo que se conoce como suavidad o ablandamiento que puede ser causado por un envejecimiento menor en planta que el obtenido por el RTFOT, agua en la mezcla o insuficiente temperatura de mezclado, etc. Este límite asegura que el asfalto no presentará ablandamiento durante las operaciones de mezclado y colocación.

Fisuramiento por fatiga de las capas asfálticas.

La fatiga de las capas asfálticas generalmente se produce hacia el final de la vida útil del pavimento. Esto requiere que el asfalto a ensayar se halla sometido a envejecimiento de largo plazo. Esto se logra mediante el PAV antes mencionado, previamente envejecido por el RTFOT.

El parámetro elegido en este caso es el componente de G^* conocido como energía perdida G'' viscosidad, que no es otra cosa que la energía disipada por ciclo de deformación. Esta energía disipada está directamente vinculada con la vida útil de una mezcla asfáltica sometida a fatiga y ha sido demostrado que el concreto asfáltico es válido tanto para condiciones de tensión como en deformación controlada.

G'' es igual a G^* multiplicado por seno de delta, esto es $G^* \sin \delta$ y es medido a 10 radianes por segundo y a una temperatura intermedia entre la máxima del pavimento y la mínima de ensayo. Este valor $G^* \sin \delta$ debe ser menor de 5 MPa medido a la temperatura media antes indicada, dado que los valores de G^* de un asfalto envejecido pueden ser tan altos que el producto $G^* \sin \delta$ se hace muy grande, lo que significa que la parte elástica del módulo es también grande y ello reduce la capacidad de disipación de tensiones.

Fisuramiento térmico por contracción a bajas temperaturas.

Este fenómeno que se manifiesta generalmente con la aparición de fisuras transversales en la superficie del pavimento es evaluado mediante el Reómetro de Flexión de viga de 3 Apoyos y el Ensayo de Tensión Directa. Las propiedades fractura - mecánica del asfalto se miden en términos de la rigidez en función del tiempo, la pendiente de la curva (m-value), y la deformación a la falla "Failure Strain". El asfalto a utilizar es sometido previamente al RTFOT y al PAV.

La temperatura de ensayo a la cual se mide la rigidez o temperatura crítica surgió de la siguiente consideración: Se ha comprobado del análisis de los resultados reológicos que todos los asfaltos, aún los modificados, muestran igual dependencia con la temperatura debajo de la temperatura vítrea de transición. Por lo tanto en lugar de medir la rigidez a dos horas a la temperatura mínima del pavimento, se pueden obtener los mismos resultados a 60 segundos y a la temperatura mínima + 10°C. La rigidez a dos horas y a la temperatura mínima es lo que se conoce como "límite de rigidez por temperatura" para predecir el fisuramiento térmico. Este valor es simplemente la temperatura a la cual un cierto valor de la rigidez es alcanzado después de un cierto tiempo especificado; a temperaturas más bajas de este límite, el pavimento experimenta fractura. Basta una sola vez que la temperatura sea más baja que la crítica para causar fractura.

Por lo tanto en la especificación se establece un límite de rigidez o fragilidad medido a la temperatura mínima del pavimento más 10°C.

En esta parte de la especificación también se controla la velocidad a la cual la rigidez cambia con la carga del deslizamiento al flujo plástico a la temperatura de ensayo. Esto se logra estableciendo un valor mínimo de la pendiente m de la curva $S(t)$ vs tiempo a los 60 segundos. Un valor alto de m es deseable dado que significa que mientras que la temperatura cambia y se acumulan tensiones térmicas, la rigidez también cambiará relativamente rápido. Esto significa que el ligante será capaz de aliviar tensiones.

A medida que la temperatura del pavimento decrece, el asfalto se contrae. Se crean tensiones que se acumulan en el pavimento. Cuando estas tensiones exceden la resistencia del asfalto aparecen las fisuras. Las investigaciones llevadas a cabo por el SHRP y otras instituciones han mostrado que si el asfalto se puede estirar más del 1% de su longitud original durante esta contracción, es menos probable que se produzcan las fisuras. De esta manera surgió la necesidad de establecer el ensayo de tensión directa y limitar la deformación a la rotura a un valor mínimo del 1 % a la misma temperatura que el BBR y a una velocidad de deformación de 1 mm/min. Con ello se asegura que el pavimento no entrará en el rango de rotura frágil dentro de sus temperaturas de servicio.

Este criterio se aplica solamente cuando el valor de la rigidez es entre 300 y 600 MPa. Esto es particularmente cierto para el caso de asfaltos modificados con polímeros los cuales se han constatado, que dependiendo del tipo y contenido, pueden mejorar substancialmente las propiedades de fractura mecánica a bajas temperaturas. Esto es, el asfalto puede tener una rigidez superior al límite y aún así poseer una deformación a rotura superior al 1%. Por lo tanto se concluye, deben considerarse tanto la rigidez como la deformación a rotura con respecto a la resistencia a fisuramiento térmico de un ligante.

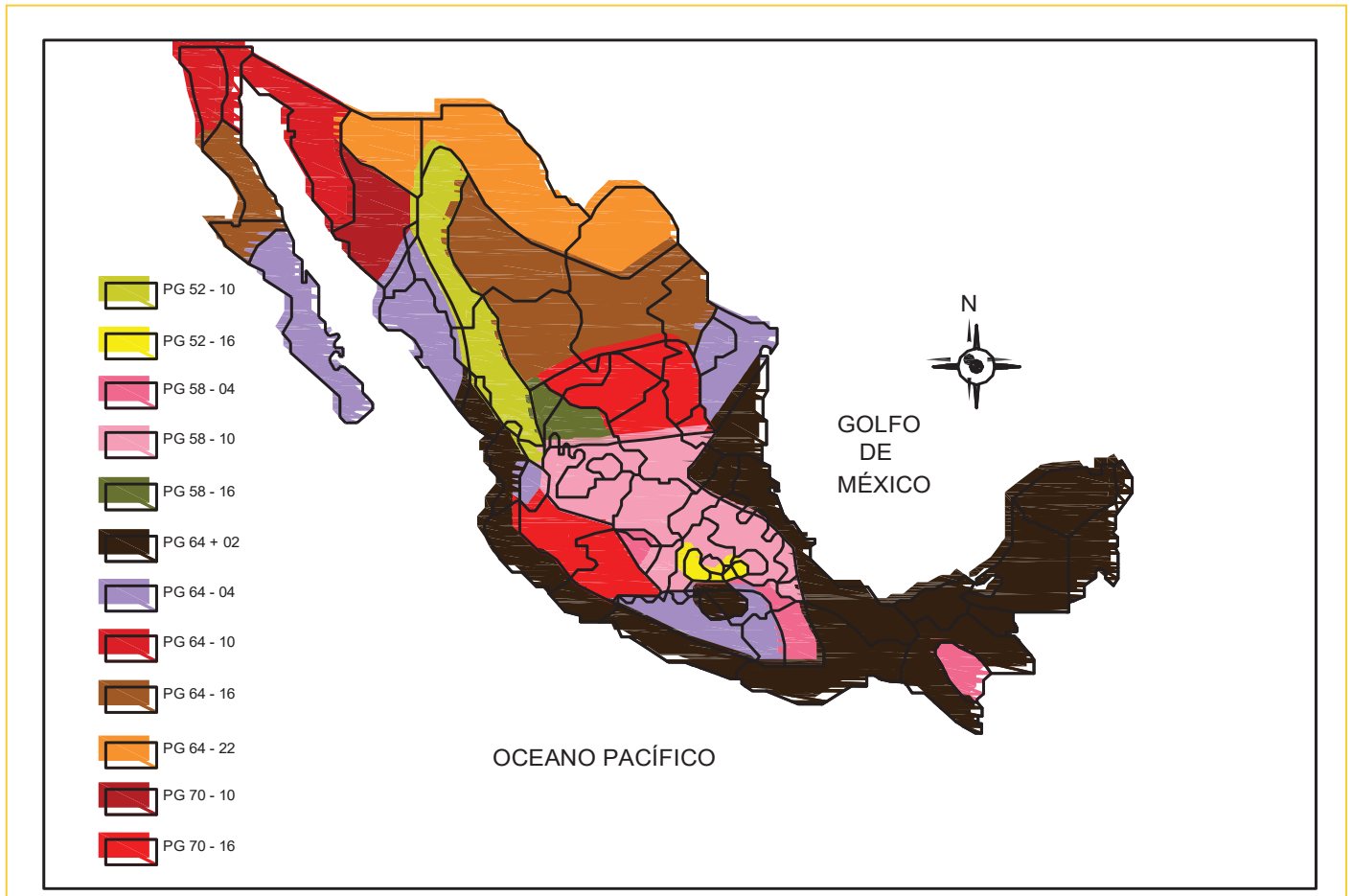


Fig. 4.5: Distribución original de zonas para asfaltos según su clasificación por Grado de Desempeño (PG) propuesta por la SHRP con un 98% de seguridad.

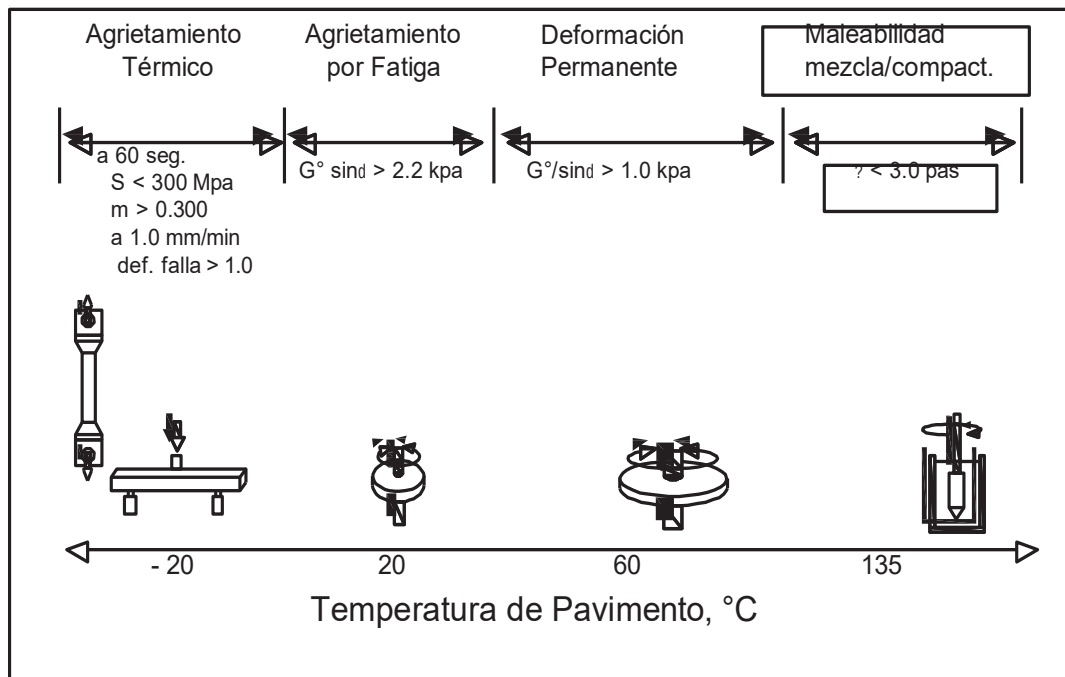


Fig. 4.6: Pruebas SUPERPAVE para propiedades físicas del asfalto

4.1.7 Aditivos modificadores del Cemento Asfáltico

Por su naturaleza, el asfalto es un material termoplástico muy susceptible a los cambios de temperatura, de manera que en zonas con temperaturas muy bajas el asfalto tiende a ser duro y quebradizo con tendencia a un sólido, mientras que en altas temperaturas es blando y su tendencia es a comportarse como un líquido. Por lo tanto en algunas situaciones donde se deba aplicar el asfalto y éste no cumpla con los requerimientos de esta zona determinada se pueden emplear aditivos para mejorar el comportamiento del asfalto a los cambios de temperatura, ayuden a resistir mejor el tránsito de los vehículos, entre otras características que se mejoran de manera significativa.

Los aditivos modificadores ayudan al asfalto a mejorar sus propiedades físicas, químicas y reológicas. Éstos se adicionan al cemento asfáltico convencional y pueden ser productos como polímeros del tipo SB, SBS, SBR,

SBRS, látex sintético y natural, polietileno, asfaltenos naturales, hule molido de neumáticos usados, aceites, resinas y catalizadores. El empleo de cualquiera de estos productos incrementa la adherencia con el pétreo, hay una mejora en la resistencia al envejecimiento y a los agentes climáticos, aumentan las propiedades de soporte, elasticidad, flexibilidad, cohesión y viscosidad. Cuando el cemento asfáltico mejora las propiedades mencionadas anteriormente alcanza un buen comportamiento al esfuerzo cortante, a la deformación y a la fatiga.

El inconveniente en el empleo de estos modificadores es que aumentan considerablemente el costo de asfalto, además de que requiere otro tipo de procedimiento constructivo en el mezclado y compactado principalmente, haciéndolo también más costoso, sin embargo lo anterior se puede compensar con el incremento en la vida útil de las obras construidas con asfalto modificado y en ocasiones al utilizar este tipo de asfalto se disminuye la proporción de éste para cumplir con los requisitos de diseño. De esta manera se busca un equilibrio costo – beneficio.

Los asfaltos modificados además de lo mencionado requieren de un mayor cuidado que los convencionales en el almacenamiento y transporte, puede presentarse asentamientos del aditivo, según la naturaleza y el tipo de este último, en ocasiones también se puede llegar a calcinar el modificador.

4.2 Orígenes de las mezclas asfálticas y su evolución

Es sabido que el principal empleo de las mezclas asfálticas se encuentra en las carreteras y utilizada como capa de rodadura, por ello es de gran importancia describir también la evolución que han tenido los caminos para vehículos automotores y los diferentes procesos de gestión que se llevan a cabo.

4.2.1 Historia de las mezclas asfálticas y su empleo en las carreteras mexicanas.

Por su aplicación es muy importante mencionar el entorno general de los tipos de pavimentos que se emplearon y se emplean en México, La mayoría de los antecedentes en cuanto a tipos de pavimentos empleados los podemos encontrar en algunas calles de la ciudad de México, pues al ser la ciudad más desarrollada de la República Mexicana sirvió de laboratorio para aplicación de una infinidad de técnicas, principalmente de pavimentación. Uno de los pavimentos más empleados fue el de cantera rosa en baldosa rectangular de 0.40 x 0.30m y cuyo espesor variaba entre 0.6 y 0.10m, la superficie de rodamiento obtenida con este material fue muy uniforme, sin embargo su resistencia a las cargas de circulación era poco aceptable optando por utilizarla solamente en plazas y zonas peatonales.

Aproximadamente para el año de 1900 se tuvo la primera aplicación de mezcla asfáltica en el Zócalo de la Ciudad de México y algunas calles del centro que fueron pavimentadas con bloques comprimidos de asfalto importados de Europa, pues en ese continente este tipo de pavimento es común ya que la producción y aplicación es económica; todo lo contrario para nuestra nación pues al importarlo y aplicarlo bajo especificaciones estrictas de los fabricantes elevan considerablemente los costos; mientras que producirlo en nuestro país implicaba el pago de patente, adquisición de tecnología y capacitación de los ingenieros y técnicos tanto en la elaboración como en el tendido. Obviamente no es el tipo de mezcla asfáltica que conocemos en la actualidad, sin embargo fue la primera aplicación de productos asfálticos en pavimentos de los que se tiene registro alguno. Los trabajos de pavimentación con este tipo de materiales fueron asignados a la compañía extranjera denominada *Barber*. La historia de estos pavimentos data desde el año de 1824, cuando la firma Pillot et Eyquem comenzó a fabricar adoquines de asfalto, que en 1837 se utilizaron para pavimentar la Plaza de la Concordia y los Campos Elíseos en París.



Fig. 4.7: Pavimento con bloques comprimidos de concreto asfáltico.

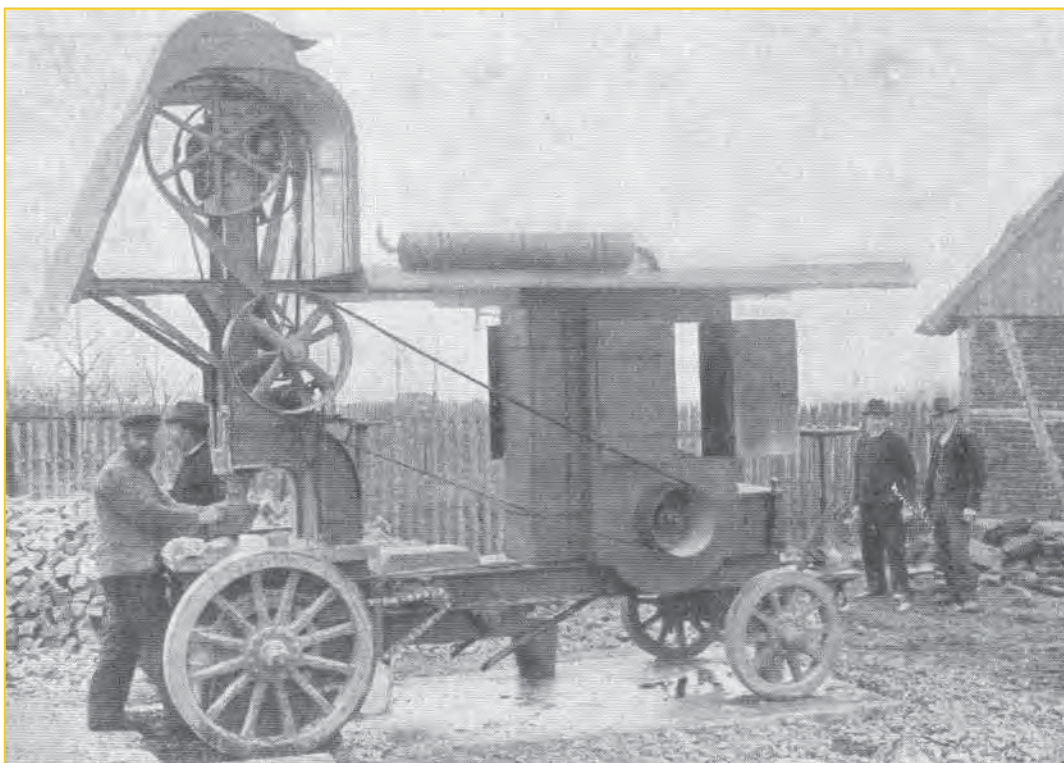


Fig. 4.8: Maquina cortadora de adoquines empleada en Europa para el año de 1900.

En el mismo año se efectuaron pavimentos ejecutados por contrato asignado a la compañía *Neufchatel* que aplicaba el pavimento tipo *macadam* consistente en la aplicación de tendidos sucesivos de piedra triturada con marro y ligadas con asfalto. Este tipo de pavimentos tenía una vida útil de 15 a 25 años y hay quienes afirman que es el mejor pavimento construido en México y el mundo, sin embargo por su proceso constructivo tan complicado resulta muy costoso.

El pavimento tipo macadam proviene desde alrededor del año 1800 cuando Thomas Telford construye más de 1,448 kilómetros de caminos en Escocia, perfeccionando el método de construcción de caminos con roca triturada a mano. Su contemporáneo John Loudon McAdam, usa roca triturada junteada para formar una superficie dura y construir una verdadera autopista escocesa; sus observaciones le mostraron que las partículas alargadas y lajeadas son más susceptibles a quebrarse con el paso de las ruedas de metal, proponiendo como solución un pavimento de tres capas de roca quebrada a mano, además de realizar importantes aportaciones al sistema de drenaje de los caminos. McAdam demostró que sus pavimentos eran dos veces más resistentes que los construidos por Telford. Después, con la finalidad de reducir costos y mantenimiento, los constructores usaron alquitrán caliente para unir los fragmentos de roca, surgiendo los pavimentos tarmacadam. Denominados más adelante en México y Estados Unidos como pavimento tipo macadam de penetración.



Fig. 4.9: John Loudon McAdam 1756-1836



Fig. 4.10: Primer pavimento americano de macadam en 1823, la pintura de Carl Rakeman indica el proceso constructivo que se empleó.

Por el año 1920 en adelante con la visión de reducir los costos de pavimentación se efectuaron estudios, ensayos y pruebas de diferentes fórmulas para seleccionar la más apropiada y fijar las normas y mecanismos para cubrir las necesidades del desarrollo urbano. Uno de los sistemas aplicados en mayor volumen, fue el denominado caminos revestidos, que consistía en nivelar las terracerías, aplicar un riego de liga – con asfalto caliente – y una capa de granzón – triturado de $\frac{3}{4}$ " aproximadamente – compactándolo adecuadamente con una aplanadora; posteriormente se cubría con una capa de arena y se aplanaba nuevamente la superficie. Este sistema dio buenos resultados en tiempos de sequía, sin embargo en el de lluvia sufría deterioros por falta de drenes para desahogar el agua. En cuanto al tránsito se presume que se encontraban sometidos aproximadamente hasta 500 vehículos diarios. Este tipo de tratamiento superficial lo encontramos aún en la actualidad para tránsitos no mayores de 2 000 vehículos diarios pero con diferente denominación, ahora es un tratamiento superficial por el sistema de uno o dos riegos, empleado principalmente en zonas

con precipitación pluvial baja. El tratamiento por tres riegos ya no es utilizado en la actualidad por su alto costo de construcción y se prefiere la colocación de una carpeta.



Fig. 4.11: Trituradora Automóvil de 12 HP, utilizada principalmente en Europa aproximadamente para el año de 1920

Se puede decir que en este momento el empleo de las mezclas asfálticas comenzaron a evolucionar de una manera muy relevante la infraestructura carretera del país al proveer de seguridad, comodidad, durabilidad, facilidad en la construcción y además de tener la capacidad de permitir el tránsito de vehículos en la mayor parte del año y a la vez de ser una superficie de rodamiento en la que se puede circular a velocidades altas.

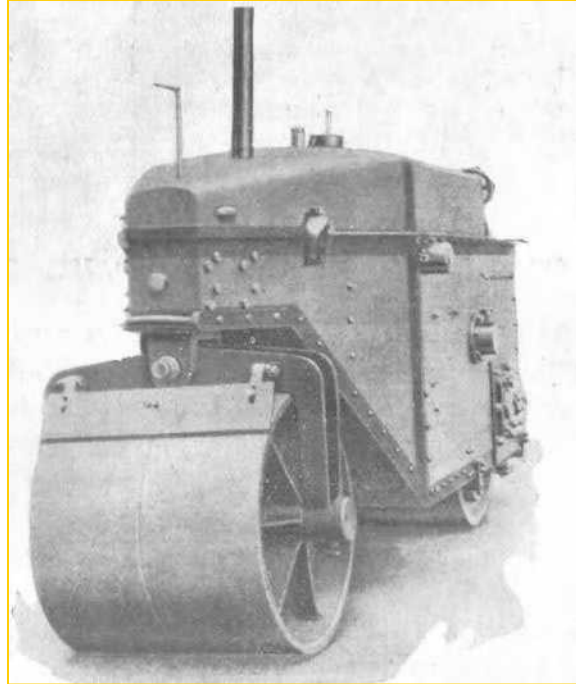


Fig. 4.12: Aplanadora de 6 toneladas con motor Diesel, presentada en la exposición de maquinaria de Atlantic City en 1930.

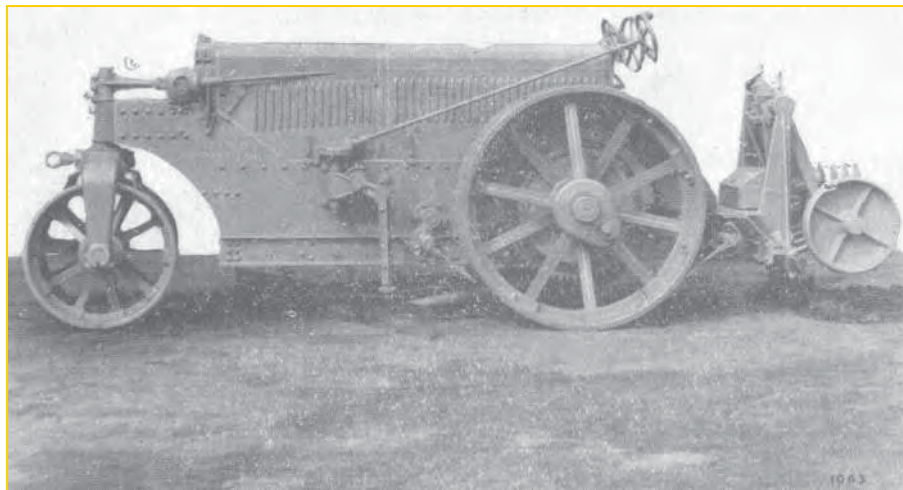


Fig. 4.13: Aplanadora Buffalo Springfield, presentada en la exposición de maquinaria de Atlantic City en 1930.

Con las experiencias ganadas, se procedió a elaborar las mezclas asfálticas en el lugar, este método consiste en afinar las terracerías, compactar, depositar el material triturado de 2" a finos en montículos esparcidos para formar un camellón con la motoconformadora; posteriormente se aplica un riego de asfalto con una

petrolizadora -llamada también asfaltadora, actualmente existe aun la discusión de ¿cómo llamar a este equipo? Petrolizadora o asfaltadora- y se vuelve el material de un lado a otro con la motoconformadora repitiendo hasta alcanzar una mezcla lo más uniforme posible, tendiéndola con el espesor adecuado de acuerdo al diseño de la carpeta proyectada, ya cuando se encuentra dentro de las tolerancias de líneas y niveles se procede a compactar la mezcla. El inconveniente de este procedimiento es la complejidad para generar una mezcla homogénea, además del control de dosificación de la cantidad de asfalto que se le agrega al pétreo.

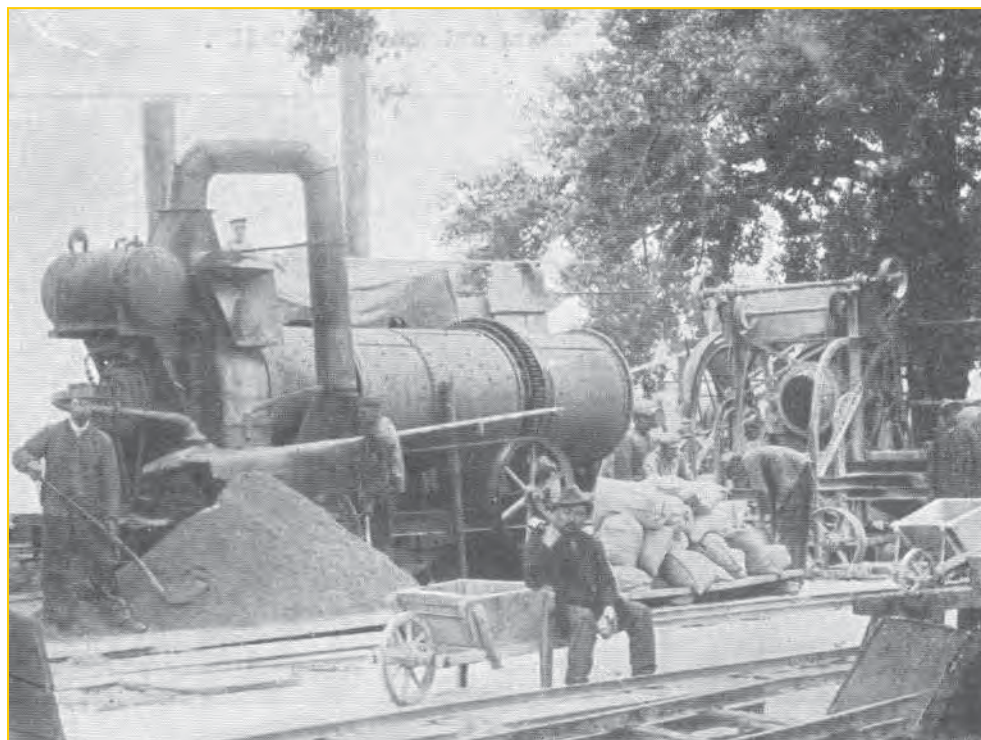


Fig. 4.14: Mezcladora de revestimientos asfálticos de producción continua, utilizada principalmente en Europa aproximadamente para el año de 1920.

La dosificación de los materiales en la elaboración de la mezcla en el lugar fue muy sencilla, pero no precisa; el control en el material pétreo se realizaba mediante el conteo de los camiones y así se determinaba la cantidad de m^3 de material en un cierto tramo; en lo referente al producto asfáltico, cualquiera que sea, se llevaba a cabo con el conteo de los tanques de la petrolizadora (asfaltadora) que se agregaban en un tramo determinado con una cantidad de m^3 de pétreo conocida, obteniendo un promedio de litros/ m^3 ; donde los litros están en función de la capacidad del tanque y del número de estos últimos descargados. La

precisión en la dosificación del producto asfáltico para las mezclas elaboradas con este procedimiento estaba a cargo de la experiencia y capacidad del operador de la petrolizadora.

Así pues el estudio de los pavimentos en México data aproximadamente del año 1930 en adelante y más detalladamente de 1934 cuando se fundó el primer laboratorio cuya finalidad era estudiar y controlar los materiales que se utilizaban en esa época, principalmente los materiales asfálticos ante el auge de éstos como capa estructural y superficie de rodamiento. Sin embargo no existía en nuestro país normativa alguna que indicara el procedimiento correcto de elaborar las mezclas asfálticas, teniendo que recurrir a la literatura extranjera, principalmente a la americana, creada principalmente por los fabricantes de asfaltos y que con base en la experiencia y a observaciones en campo y en laboratorio emitieron una serie de recomendaciones para la elaboración de las mezclas asfálticas.

Los avances en la tecnología para la aplicación de estos pavimentos se derivan en la creación de pequeñas plantas de mezcla asfáltica tanto en caliente como en fría. Las primeras aportaciones en esta materia las realizó el departamento central del Distrito Federal con la instalación de dos plantas de mezcla asfáltica en caliente, aproximadamente en el año de 1936, le siguió otra planta en la ciudad de Chihuahua que se instaló en 1938 principalmente para el mejoramiento de las superficies de rodamiento en calles y calzadas dentro de la ciudad.



Fig. 4.15: Motoconformadora tendiendo mezcla asfáltica, además equipada en su parte trasera con una especie de terminadora superficial utilizada en los años treinta. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.

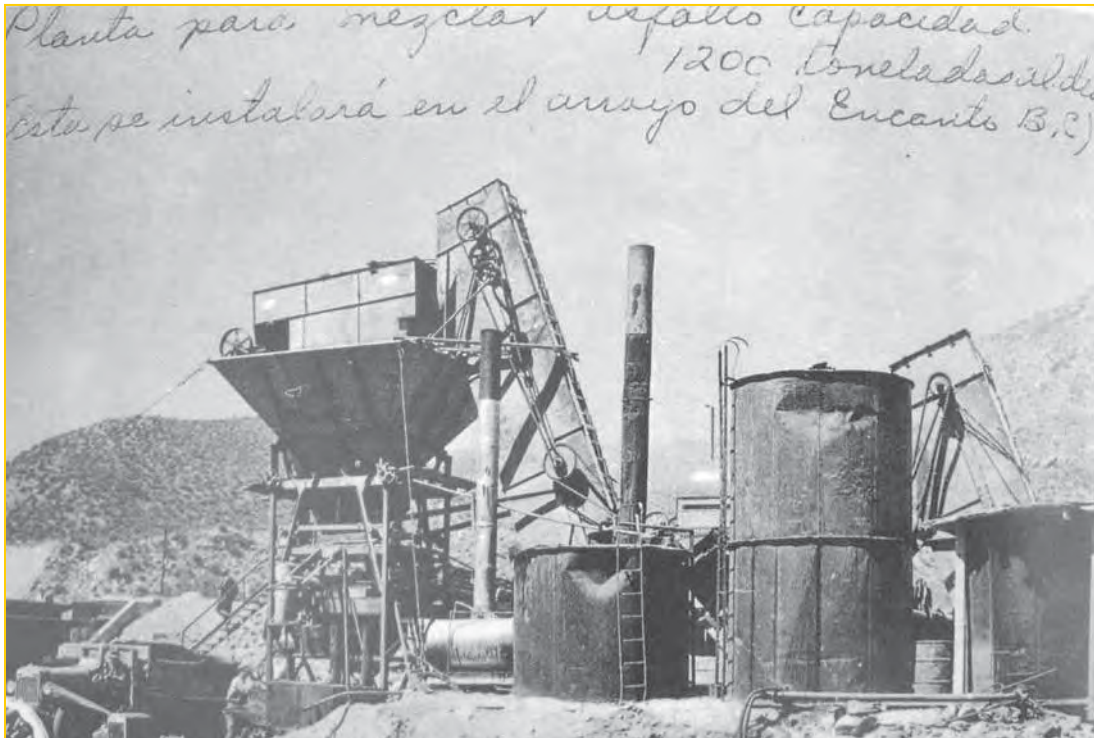


Fig. 4.16: Planta mezcladora de asfalto de producción discontinua con capacidad de 1200 toneladas al día, que fue instalada en el arroyo del Encanto, Baja California aproximadamente en 1933. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.

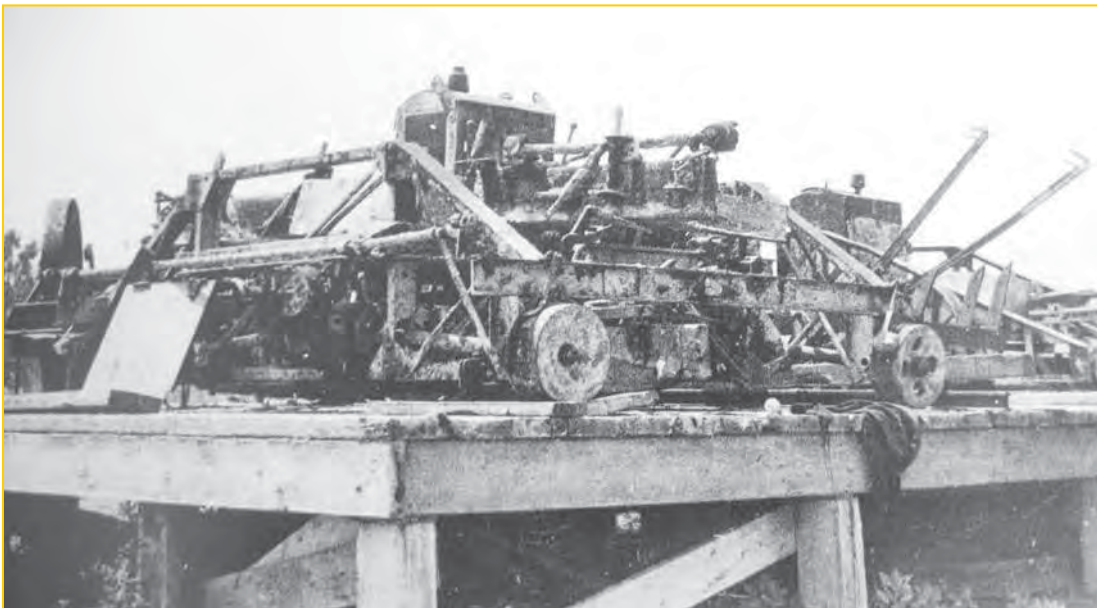


Fig. 4.17: Maquina antecesora de la actual pavimentadora (Finisher) la cual fue empleada para revestir y terminar el pavimento asfáltico. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.

La mayoría de los materiales pétreos empleados en la elaboración de mezclas asfálticas fueron los procedentes de los ríos a los cuales, por su variada granulometría, solamente se les aplicaba un proceso de cribado y de esta manera obtener la granulometría deseada. Alrededor del 80% de los materiales fluviales presentan una mala adherencia con el asfalto, así fue que entre los años de 1945 y 1946 se identificó en las mezclas éste problema, haciendo necesaria la aplicación de aditivos promotores de adherencia.

Con la introducción del sistema de mezcla en caliente se presentaron aún más los problemas de adherencia entre los materiales, esta característica se revisaba al momento de mezclar los materiales y se realizaba de manera cualitativa con base en la experiencia del personal encargado del mezclado, el cual determinaba si fuese necesario la aplicación de aditivos promotores de adherencia o no; Cuando se utilizaban productos rebajados o emulsiones era muy fácil determinar si el pétreo presentaba problemas de adherencia con el asfalto o no, pues en caso de una falta de adherencia el proceso de mezclado se tornaba muy complicado; Con las plantas de mezclado en caliente y con su proceso hasta cierto punto automatizado fue más complicado observar esta característica, además de que el calor favorecía para que el asfalto aparentara un cubrimiento uniforme con el agregado, apareciendo los problemas de desprendimiento en los tramos en donde se tendía esta mezcla.

En el año de 1947, la Dirección Nacional de Caminos de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Publicas emite las Especificaciones de Caminos donde el capítulo relacionado a mezclas asfálticas no llega más allá de ser una traducción de las Especificaciones de Construcción del Instituto del Asfalto (Construction Specificatios, The Asphalt Institute).

Estas especificaciones mencionan de manera general la calidad de los materiales tanto asfálticos como pétreos y procedimientos para la elaboración de los diferentes tipos de mezcla asfáltica:

- Tratamiento superficial de tres riegos. Consiste en aplicar tres riegos de material bituminoso y cubrirlo con material pétreo, empleando diferentes granulometrías según el espesor requerido de la carpeta.
- Macadam bituminoso de penetración de cinco centímetros de espesor.
- Macadam bituminoso de penetración de diez centímetros de espesor.
- Tratamiento bituminoso de la grava (Mezcla en planta).
- Tratamiento bituminoso de la grava (Mezcla en el lugar).

Sin embargo ante el poco conocimiento de estas especificaciones no se aplicó como normativa, simplemente se empleo como una referencia.

Para el año de 1957 se observó un cambio importante en las especificaciones ya que se adaptaron un poco a lo utilizado en nuestro país, no dejaban de ser copias de especificaciones norteamericanas, principalmente, pero tomando en cuenta los materiales y procesos constructivos empleados en nuestro país. También nos describen la calidad de los materiales, proceso de elaboración y construcción de la mezcla asfáltica. Los principales tipos de mezclas asfálticas que menciona son las siguientes:

- Riego de impregnación. Es la aplicación de un producto asfáltico rebajado de fraguado medio o lento, a la base terminada para impregnar superficialmente y hasta la profundidad que penetre el producto asfáltico.
- Carpetas por el sistema de riegos. Son las que se construyen de uno o más riegos de producto asfáltico cubiertos sucesivamente con capas de materiales pétreos de diferentes tamaños triturados o cribados, estas carpetas pueden ser de uno, dos, tres o cuatro riegos, según el espesor deseado de la carpeta. El número de riegos que se aplique es el que da el nombre a la carpeta.
- Carpetas de concreto asfáltico por el sistema de mezcla en el lugar. Son las que se construyen mediante el tendido y compactación de un concreto asfáltico hecho por mezcla sobre el camino, de materiales pétreos con un producto asfáltico.
- Carpetas de concreto asfáltico por el sistema de mezcla en planta estacionaria. Son las que se construyen mediante el tendido y compactación de un concreto asfáltico hecho por mezcla en planta estacionaria, de materiales pétreos con un cemento asfáltico o producto asfáltico.
- Riego de sello. Es la aplicación de un producto asfáltico rebajado o emulsión asfáltica de fraguado rápido sobre las carpetas de concreto asfáltico hechas por el sistema de mezcla en el lugar o mezcla en planta y cubierto con material pétreo número 3-A o 3-B y su función es la de impermeabilizar la carpeta asfáltica y protegerla del desgaste ocasionado por el tránsito vehicular.

En las especificaciones de este año también se mencionaron las recomendaciones para la aplicación de los distintos productos asfálticos según el tránsito del camino.

Tabla 4.5: Empleos recomendables del cemento asfáltico en la construcción de carpetas y sobrecarpetas. Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1957.

Material Asfáltico	Empleo recomendable en el empleo de carpetas y sobrecarpetas.	
	Para carreteras: Tránsito diario en ambos sentidos, en vehículos pesados.	Para aeropistas: Aviones con peso total en Toneladas.
Cemento Asfáltico	Más de 1000	Más de 20
Asfalto rebajado	1000 máximo	20 máximo
Emulsión asfáltica con disolventes	1000 máximo	20 máximo
Emulsión asfáltica sin disolventes	1000 máximo	20 máximo

Ante el incremento de la utilización de las mezclas asfálticas en caliente para el año de 1950 ya se tenían alrededor de 12 o 14 plantas y para 1960 ya existían en México más de 40 plantas de producción discontinua o también llamadas *bachas* por su nombre en ingles *Batch Plant*. Estas plantas tienen un control de dosificación por masa, además el tambor secador de agregado pétreo es independiente del área de mezclado asfalto – pétreo, características que hacen que la mezcla asfáltica cumpla cabalmente con los requisitos de diseño.

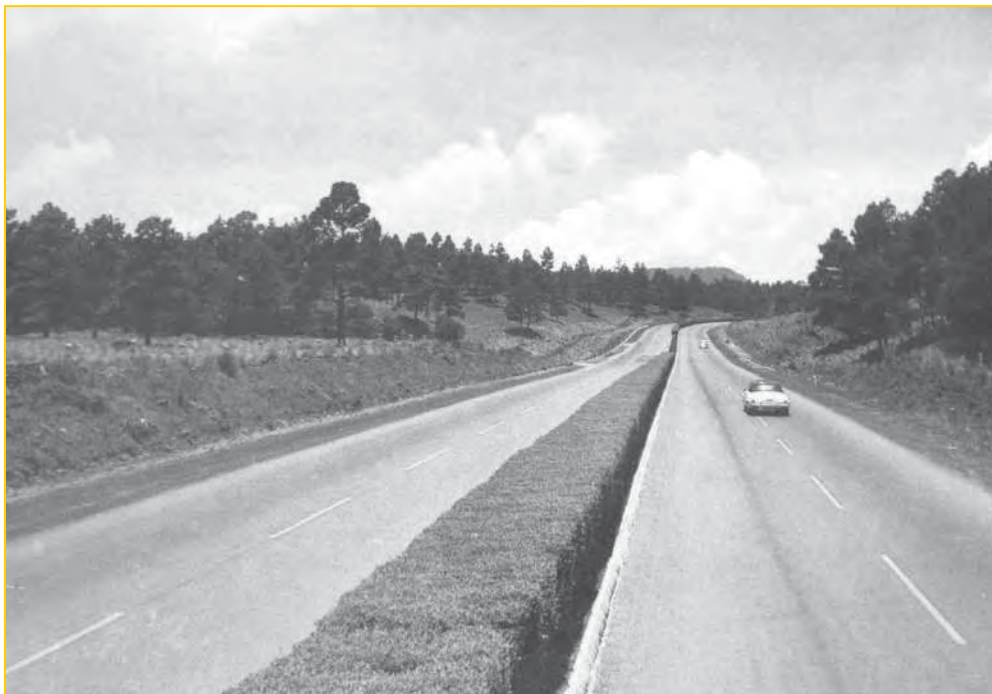


Fig. 4.18: Camino México – Cuernavaca; primera imagen 1925; segunda corresponde a la autopista en 1957. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.



Fig. 4.19: Riego de asfalto en la construcción de la autopista México - Cuernavaca. Fuente: Historia de los caminos de México, tomo 3; siglo XX, Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C.

Conforme fueron avanzando los años, se apremio la necesidad de tener plantas de mezclado que hasta cierto punto fueran portátiles y así llevarlas a los tramos por construir y disminuir considerablemente los tiempos de acarreo. Surgieron entonces las plantas de producción continua de contraflujo y de flujo paralelo. Se dice en palabras del Ing. Gabriel Gutiérrez Rocha, que estas últimas generan una mezcla con calidad tres veces inferior que la planta de batch, siendo las plantas de producción continua de contraflujo una buena opción para no tener esa pérdida tan grande en la calidad.

4.2.2 Estado actual de las mezclas asfálticas.

Las mezclas asfálticas tienen un futuro muy comprometedor y a la vez fundamental en el desarrollo de la infraestructura mexicana ya sea por las características inmejorables que proporciona al camino para el tránsito de los vehículos modernos o por su buen comportamiento al distribuir las solicitudes de carga ejercida por éstos. En México tenemos la ventaja de ser un país productor de petróleo y por lo tanto de cemento asfáltico, sin embargo en ocasiones se puede considerar como desventaja ya que se malgasta el asfalto al producirlo de mala calidad y aplicarlo sin ningún control.

Actualmente en busca de la rentabilidad de las empresas constructoras se sacrifica considerablemente la calidad de las mezclas asfálticas mediante la instalación de plantas de producción continua de flujo paralelo por ser portátiles, económicas y de fácil empleo. De éstas podemos encontrar un gran número en nuestro país, sin embargo plantas de producción continua de contraflujo existen en México aproximadamente cinco y hablando de plantas de bachas podemos encontrar una o raramente dos.

El futuro demandará del constructor la aplicación de nuevas técnicas, equipos y materiales para la construcción de las vías terrestres modernas y por lo tanto debe ser un compromiso su actualización en estos campos. Así mismo los grupos de trabajo encargados de la supervisión y control de calidad de la obra deberán estar igualmente capacitados para cumplir satisfactoriamente su tarea.

Las vías terrestres modernas requieren y requerirán cumplir con altas especificaciones para poder satisfacer los requisitos que imponen e impondrán los vehículos que la operen. Tales especificaciones no solo se refieren a los aspectos geométricos, sino que también deben alcanzar a la superestructura misma, así como a las terracerías. De esta manera, los conceptos del diseño deben cambiar o modificarse, incluyendo el uso de materiales más resistentes, más homogéneos y más durables. Esto significa que el constructor debe de estar capacitado para su procesamiento, manejo y colocación, también durante la construcción las acciones de supervisión y control de calidad deberán ser más efectivas, a fin de que se cumpla satisfactoriamente con las especificaciones de proyecto. Deberán emplearse técnicas racionales de muestreo y ensaye, procedimientos rápidos y efectivos de análisis e interpretación y, sobre todo, mayor énfasis en los aspectos preventivos del control de calidad. De igual manera es conveniente el empleo de los equipos de construcción adecuados, mecanizando y modernizando algunos procesos en los cuales el empleo de equipos y maquinarias especializadas es inevitable.

Otro aspecto que merece especial atención es el referente a la vigilancia de la seguridad, economía en la operación y seguridad del usuario. Para tal efecto, deberá ponerse énfasis en la calidad de los acabados de la superficie de rodamiento. Para lo cual se requiere contar con especificaciones que vigilen estos aspectos, técnicas y equipos de construcción que las puedan cumplir, así como los procedimientos y herramientas capaces de controlarlas en el campo y evitar que los defectos constructivos constituyan una falla funcional.

Los resultados obtenidos no solamente servirán para determinar su cumplimiento, sino que a la vez, constituirán la información básica de partida para seguir en el transcurso del tiempo el comportamiento de la obra y planear su mantenimiento.

A este respecto conviene mencionar que los proyectistas y supervisores deben tener igualmente una activa participación, mediante la integración de proyectos y especificaciones adecuados, la proposición del empleo de nuevas técnicas y materiales, así como la vigilancia en la obra del cumplimiento de los proyectos. La participación conjunta de estos tres grupos, constructores, proyectistas y supervisores, en conjunto con la innovación en diseño de materiales, harán posible conseguir la infraestructura del transporte que el país requiere para su desarrollo, el cual es el reto del futuro.

4.2.3 Materiales pétreos para mezclas asfálticas.

En el transcurso de los años la tecnología avanza de manera impresionante y con ello los métodos de fabricación y análisis de los materiales pétreos, que generan a su vez nuevas especificaciones en la calidad para garantizar que las mezclas asfálticas elaboradas con estos materiales sean mezclas duraderas y distribuyan de manera adecuada las cargas, además aquellas que tienen la función de capas de rodadura deben de ser además cómodas y seguras.

Se ha dicho que el avance en la calidad de las mezclas asfálticas ha ido de la mano con la evolución de los tratamientos que se le han dado a los materiales pétreos, de aquí que en la actualidad se aplique una selección rigurosa para asegurar su calidad, mencionado lo anterior los materiales utilizados para la elaboración de las mezclas asfálticas deberán de ser de los tipos siguientes:

- Materiales que requieren ser cribados. Son aquellos poco o nada cohesivos que al extraerlos queden sueltos y que deban ser tamizados por una o varias mallas para obtener los tamaños requeridos.
- Materiales que requieren ser triturados parcialmente y cribados. Sus características principales son ser poco o nada cohesivos, o bien materiales cohesivos que al extraerlos resultan con terrones que pueden disgregarse, así mismo aquellos en los que una porción del material requiera disminuir su tamaño para que sea el adecuado para la mezcla asfáltica.
- Materiales que requieren ser triturados totalmente y cribados. Son aquellos extraídos de bancos, principalmente de roca dura que requieren de un medio mecánico para que se presente el fracturamiento del agregado y de esta manera reducir considerablemente sus tamaños, al mismo tiempo que se tamizan para obtener los tamaños requeridos.
- Actualmente se ha utilizado el pavimento reciclado o RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) como una importante fuente de agregado mineral para la producción de mezclas asfálticas nuevas.

Los materiales mencionados en los párrafos anteriores pueden requerir de lavado o no, según la materia orgánica y/o cohesiva que presenten, así mismo de las especificaciones particulares que deba requerir el material para ser mezclado con el asfalto.

Por lo general para cumplir con las especificaciones deseadas se toman suficientes características para que representen la calidad y el comportamiento del material durante el mezclado y durante su periodo de vida útil. Siempre buscando que el agregado provea de a la mezcla de un fuerte esqueleto mineral para resistir las repetidas aplicaciones de carga.

En los párrafos siguientes se muestra cuales son las características para tomar en cuenta en la selección de un adecuado agregado pétreo.

➤ *Peso específico*

La normativa de 1987 determina el peso específico relativo aparente por inmersión del material pétreo en cemento asfáltico fluidificado para después calcular el porcentaje de vacíos de mezclas asfálticas compactadas.

➤ *Granulometría*

La granulometría nos indica parte fundamental del comportamiento que tendrá la mezcla asfáltica elaborada y si existe esqueleto mineral o no. Esta ha variado considerablemente de una especificación a otra más reciente, esto debido al avance en los instrumentos de prueba de las mezclas asfálticas ya elaboradas y su investigación.

En las especificaciones de caminos de 1947, se especifica la siguiente granulometría para mezclas asfálticas en el lugar o en plantas estacionarias:

Todo el material deberá pasar por la criba de 25mm y por lo menos el 60% y no más del 75% deberá ser retenido en la criba de 12mm; por lo menos el 35 por ciento y no más del 50% del material que pase por la criba de 12mm deberá ser retenido en la criba de 6.3mm. Por lo menos el 60% y no más del 70% del material que pase por la criba de 6.3mm deberá ser retenido en el cedazo del número 40. Por lo menos el 40% y no más del 70% del material que pase por el cedazo del número 40 deberá ser retenido en el cedazo del número 200.

Para 1957 las especificaciones indican en cuanto a granulometría una zona específica, así pues la granulometría del material pétreo a utilizar debe encontrarse dentro de la zona mencionada.

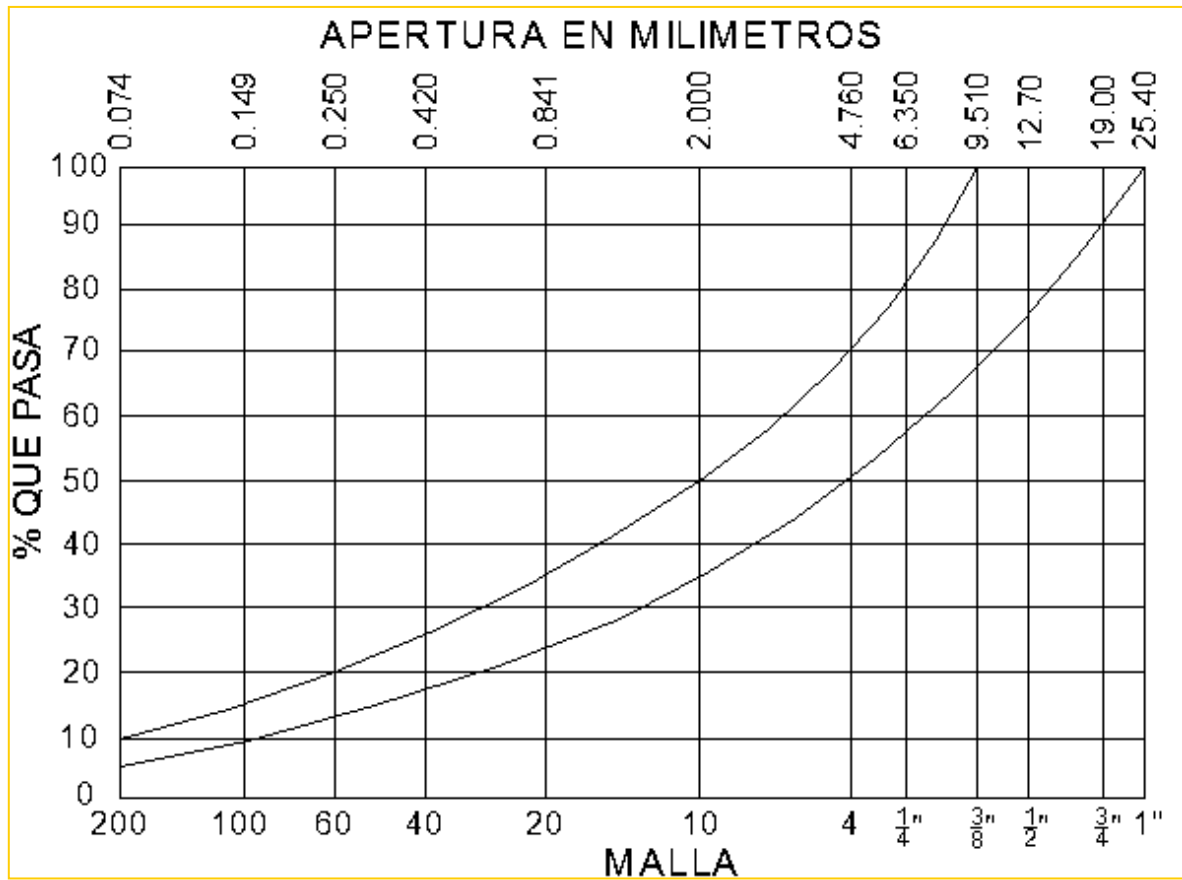


Fig. 4.20: Zona de especificación granulométrica para materiales pétreos que se empleen en concretos asfálticos. Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1957.

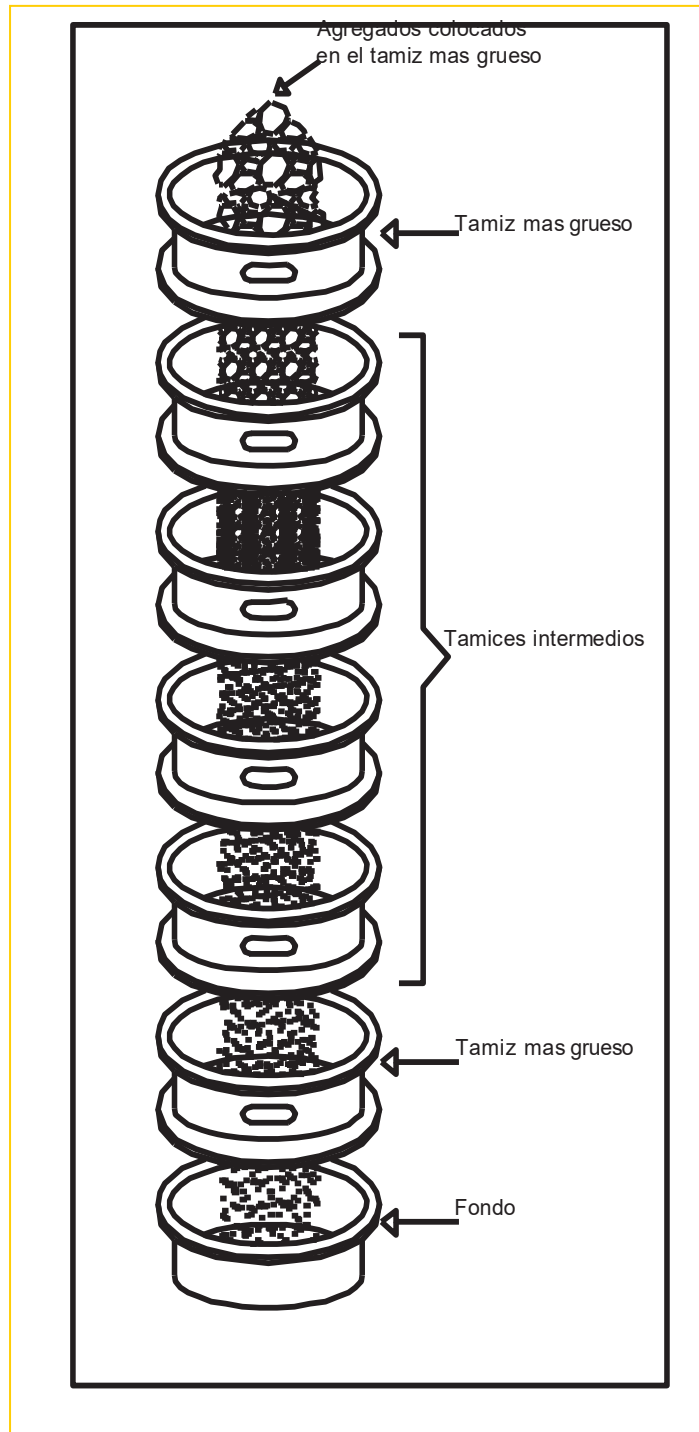


Fig. 4.21: Tamizado del material para obtener su granulometría.

➤ *Límites de Atterberg y pruebas complementarias.*

Se incluye en las normas de la SCT desde 1981 a fin de conocer el grado de plasticidad de los finos, que sería un indicio de la presencia de arcilla, la cual puede ser perjudicial para la mezcla asfáltica dependiendo de su actividad, cantidad y forma en que se presente. En general cuando existe presencia de la arcilla en el material a utilizar para la elaboración de las mezclas asfálticas ocasiona una deficiencia en la adherencia de la película asfáltica, además si se encuentra en forma de grumos, estos constituyen un punto débil en la carpeta, principalmente en presencia de agua. Para analizar esta característica se realiza mediante la prueba de contracción lineal.

➤ *Afinidad entre el material pétreo y el asfalto.*

El objetivo es determinar algunas propiedades relativas a la afinidad entre las partículas del material pétreo y la película de asfalto que las cubre, para conocer si entre dichos materiales existe una liga que permita condiciones de estabilidad satisfactorias. La determinación de la afinidad del material pétreo es un factor importante para juzgar el comportamiento de las capas asfálticas de un pavimento. Las fallas encontradas en los pavimentos asfálticos debidas a falta de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, obedecen, en la mayor parte de los casos, a la introducción de agua en la carpeta asfáltica. Si el agregado pétreo o mejor dicho la superficie de la partícula de agregado, presenta mayor afinidad al agua que al asfalto, la primera es atraída hacia la superficie de la partícula, desalojando la película de asfalto, quedando destruida la adherencia existente entre ambos materiales, que es necesaria para darle estabilidad a la carpeta. Este tipo de agregados pétreos se denominan hidrófilos, es decir, que presentan afinidad por el agua. A los materiales pétreos que presentan mayor afinidad por el asfalto que por el agua se les llama hidrófobos.

La falta de adherencia entre el asfalto y el agregado puede ser debida también a la presencia de una película de polvo o de arena fina adherida a la partícula adherida a la partícula de material pétreo.

Existen diferentes pruebas para la determinación de esta característica, se mencionarán las más comunes:

- **Desprendimiento por fricción.** Esta prueba normada desde 1981 estima la afinidad a través de la adherencia que se presenta en la interface material pétreo – asfalto, el fundamento de esta prueba es mezclar el pétreo con el asfalto y darles un curado en el horno para simular el mezclado en obra, para después colocar la mezcla en un vaso de vidrio al cual se le agrega agua destilada o potable tapándolo herméticamente, el paso siguiente es sumergir los vasos con la mezcla en un baño maría a 25°C durante 16 a 20 horas, se observa el desprendimiento ocurrido, pasado el tiempo adecuado se sacan los frascos del baño y se instalan en la máquina de agitación sometiendo los frascos a cuatro periodos consecutivos de agitación de quince minutos cada uno. El porcentaje de superficie de las partículas en que haya ocurrido desprendimiento de asfalto se determina visualmente con la ayuda de una lupa. Si el desprendimiento obtenido es mayor de un 25%, se considera que el material no cumple el requisito de afinidad con el asfalto.
- **Cubrimiento con asfalto.** Basado en el método inglés, que tiene por objeto determinar la facilidad con que la película de un producto asfáltico rebajado se adhiere a un agregado pétreo en presencia de agua. Los resultados de esta prueba son estimativos y sirven para juzgar la susceptibilidad al desprendimiento del material pétreo producido por el agua, principalmente, en carpetas de riegos, riegos de sello y riegos de impregnación. El procedimiento es verter de 15 a 20 gramos de producto asfáltico sobre el fondo de una charola formando una película de 1.5mm de espesor, se sumerge la charola en un baño maría a 20°C y un tirante de agua de 25mm, se coloca con la mano el material pétreo sobre la charola con el asfalto presionando ligera y uniformemente dejándolas en estas condiciones durante un lapso de diez minutos, a continuación se toman con las manos las partículas de material pétreo y se estima visualmente el porcentaje de la superficie del material pétreo cubierta con asfalto, en relación con la superficie total de las partículas que se considera haya estado sumergida en la película de asfalto; este porcentaje será el de cubrimiento. Un valor de cubrimiento entre 90 -100% se considera adecuado mientras que menor de 90% no cumple con el requisito de afinidad.
- **Desprendimiento de la película.** Tiene por objeto determinar estimativamente el desprendimiento del asfalto en el agregado pétreo,

cuando la mezcla de prueba es sometida a un proceso de agitación en agua. Se observa el desprendimiento del asfalto ocurrido en las partículas, el cual se estima como porcentaje de la superficie total del material pétreo. Si dicho desprendimiento excede de 25% se considera que el material no cumple con el requisito de afinidad.

- **Pérdida de estabilidad por inmersión en agua.** Se aplica a mezclas asfálticas compactadas desde 1981 (Normativa SCT) y consiste en determinar la disminución de resistencia a la compresión sin confinar, que se presenta en especímenes sumergidos en agua después del curado, en relación con sus respectivos duplicados curados en el horno y que no se someten a la inmersión en agua. Si la pérdida de estabilidad por inmersión en agua es mayor del 25% se considera que no cumple con la afinidad requerida.

En caso de que los resultados obtenidos en las pruebas de afinidad no sean satisfactorios, se podrán mejorar las características de adhesividad entre el agregado pétreo y el asfalto, mediante algún tratamiento mecánico del pétreo, cambio de asfalto o empleo de aditivos promotores de adherencia. El tratamiento adecuado será aquel con el que se obtengan resultados favorables en las pruebas de afinidad.

➤ *Resistencia a la abrasión.*

Esta característica se determina mediante el desgaste de los materiales pétreos que se emplean en la construcción de mezclas asfálticas, carpetas de riegos, riegos de sello y otros usos, para estimar el efecto perjudicial que origina a los materiales su grado de alteración, su baja resistencia estructural, planos de debilitamiento, planos de cristalización, forma de las partículas ya que en las partículas con forma laja las aristas vivas sufren una fuerte abrasión durante la prueba, etcétera; la prueba consiste en someter a las muestras de material pétreo seco a un proceso de abrasión. La resistencia a la abrasión de un material se puede encontrar mediante el empleo de la máquina de Los Ángeles y de la máquina Deval.

La prueba empleando la máquina Deval se aplica en México (Normativa SCT) desde el año de 1981 y se puede realizar siguiendo dos procedimientos; el primero consiste en introducir en los cilindros de esta aproximadamente 50 trozos

de roca más o menos cúbicos, sin vértices agudos ni aristas salientes que den un peso total de 5 kg, se hace girar la maquina y la abrasión se presenta con el rozamiento y golpeteo entre los propios trozos del material; En el segundo se introduce la muestra de determinada granulometría, sin importar la forma de las partículas, junto con esferas metálicas y mediante una rotación de dicha maquina se originan entre las esferas y el material cargas abrasivas y de impacto. El resultado que se obtiene es el porcentaje de desgaste.

Otro método del que se tiene registro también en México desde 1981 es efectuando la prueba en la máquina de Los Ángeles, su procedimiento de prueba es similar al segundo mencionado de la máquina Deval pero su aplicación es en materiales con granulometría más gruesa y su objetivo es determinar el desgaste de material pétreo en porciento.

➤ *Resistencia al Intemperismo.*

Esta resistencia es un índice de grado de alteración que puede alcanzar el material por la acción de los agentes atmosféricos. Se determina desde 1981 (Norma SCT) con la prueba de intemperismo acelerado y tiene por objeto estimar la alteración que pueden sufrir los materiales pétreos al estar expuestos a la acción del intemperismo, cuando se utilizan en la construcción de carpetas y riegos de sello; consiste en someter a dichos materiales a varios ciclos de saturación en soluciones de sulfato de sodio o de magnesio, y de secado en horno, que producen degradación de los materiales pétreos, la cual se considera como una medida de la susceptibilidad de los mismos a los efectos del medio ambiente. Se calcula el porciento en peso que pierden la porción gruesa y la porción fina.

➤ *Forma de las partículas.*

La resistencia de las partículas al quiebre es en función de la forma de la partícula, para ello se determina la relación entre las dimensiones de las partículas de material pétreo, con el objeto de clasificarlas en cuanto a su forma alargada o forma de laja y conocer los porcentajes que de cada uno de ellas contienen los materiales pétreos utilizados en la construcción de mezclas asfálticas. Las partículas en forma de laja son aquellas que tienen una relación entre su espesor

y su ancho menor de cero punto seis, mientras que las partículas alargadas son las que tienen una relación entre su largo y su ancho mayor de uno punto ocho. Por lo tanto el objetivo es determinar el contenido de partículas alargadas y lajeadas en una muestra de material.

4.2.4 Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa.

Al principio del empleo de las mezclas asfálticas no se realizaba diseño alguno, eran simplemente recetas de cocina o también se elaboraban con base en la experiencia y criterio del ingeniero a cargo de la obra.

Un ejemplo de las recetas de cocina son las Especificaciones de Caminos de 1947 que define a las mezclas asfálticas en el lugar (Tratamiento bituminoso de la grava, mezcla en el lugar) como la mezcla sobre el camino de los materiales que forman el revestimiento con un 8% a 9% en volumen de asfalto.

Sin embargo debe conocerse que la proporción óptima de asfalto que es necesario agregar para aglutinar el material pétreo que formará una carpeta de rodamiento, es función de las características del agregado, de su graduación y del propio asfalto. El contenido de asfalto que se considera como óptimo es aquel que produce la mejor combinación de resistencia estructural y durabilidad en la carpeta. Esta última es función directa, dentro de los límites prácticos, del espesor de la película asfáltica que cubre las partículas del agregado; es decir que a mayor espesor de la película, corresponde una mayor resistencia al intemperismo y a la abrasión producida por los vehículos, siempre y cuando el asfalto sea de buena calidad.

En cuanto a la resistencia estructural se puede considerar que para un mismo agregado pétreo y variar el espesor de la película de asfalto se pueden presentar los siguientes casos:

- Poca cantidad de asfalto, pero la adecuada para servir como ligante. Dentro de esta condición se presenta la máxima resistencia estructural pero durabilidad mínima.
- Mayor cantidad de asfalto que en el punto anterior. La película de asfalto actúa con menor poder ligante y comienza a observarse un cierto grado de lubricación entre las partículas de agregado, disminuyéndose por esta causa la resistencia estructural y

aumentando la durabilidad. Dentro de esta condición se presenta el espesor de la película de asfalto que proporciona a la carpeta la mejor combinación de resistencia y durabilidad que corresponde al contenido óptimo de asfalto.

- Cantidad de asfalto excedido. Actúa como lubricante y por lo tanto se provocan deformaciones o desplazamientos perjudiciales ocasionados por el peso de los vehículos.

Además de la cantidad de asfalto óptima, es conveniente ensayar diferentes combinaciones de granulometría a fin de obtener la mejor combinación de estabilidad, durabilidad y costo de la mezcla asfáltica. Para ello es necesario elaborar un diseño de la mezcla asfáltica y se pueden emplear los métodos que adelante se describen, tomando en cuenta que cada uno de ellos toma parámetros diferentes y por lo tanto arroja resultados distintos, dependerá del proyectista el determinar cual método utilizar considerando que el ideal es aquel que reproduce en el laboratorio las condiciones de campo.

Un diseño adecuado, en términos generales consistirá en elaborar las muestras de mezcla asfáltica o darles el tratamiento adecuado para asegurar en las mismas, características a las que tenga o vaya a tener en la obra la mezcla elaborada.

➤ *Método Marshall*

El método Marshall se describe por vez primera en México en las normas de construcción de la SCT de 1981 y se basa en la determinación de la estabilidad y el flujo en especímenes cilíndricos, compactados axialmente con un sistema determinado y probados a sesenta grados Celsius.

El método Marshall fue desarrollado por el Ingeniero Bruce Marshall, trabajador del Mississippi State Highway Department, aproximadamente en los años 1930's. Una de las virtudes del método es la importancia que asigna a la propiedad densidad/vacios de la mezcla, además de que el equipamiento requerido no es caro y es muy portable teniendo una gran facilidad de instalar laboratorios de control de calidad equipados adecuadamente en la zona de construcción.

Este método es aplicable originalmente a mezclas en caliente con tamaño máximo de agregado (TMA) de 1", sufriendo una modificación para que tenga aplicación en mezclas de TMA mayores a 1.5".

El valor de estabilidad expresa la resistencia estructural de la mezcla compactada y está afectada principalmente por el contenido de asfalto, la composición granulométrica y el tipo del agregado. Principalmente el valor de la estabilidad es un índice de la calidad del agregado.

El valor de flujo representa la deformación requerida, en el sentido del diámetro del espécimen, para producir su fractura. Este valor es un indicador de la tendencia de la mezcla para alcanzar una condición plástica y consecuentemente de la resistencia que ofrecerá la carpeta a deformarse bajo la acción de las cargas impuestas por los vehículos.

Elaboración de los especímenes.

Fijada la granulometría de la mezcla asfáltica, se determinara el porcentaje en peso de cada uno de los tamaños de agregado pétreo, para cada contenido de asfalto se fabricarán tres especímenes, cada uno de los cuales requiere aproximadamente 1200g de agregado pétreo. Se tomara de cada uno de los tamaños la cantidad de muestra que resulte de multiplicar el porcentaje en peso de cada fracción por el peso total de la muestra. Las fracciones ya pesadas se mezclaran previamente a la adición del cemento asfáltico. La cantidad de cemento asfáltico que deberá agregarse a cada muestra, se calculará sobre la base del contenido mínimo de asfalto, que se determina por el método explicado anteriormente. Por lo tanto, los especímenes se conformaran con -1.0% del contenido de asfalto mínimo calculado, con el contenido de asfalto neto, +0.5%, +1.0%, +1.5% y 2%, teniendo un total de 18 especímenes.

Se mezclarán los agregados y el cemento asfáltico, calentados previamente a las temperaturas de 175°C y 120°C respectivamente, hasta obtener una distribución uniforme del asfalto. La mezcla nunca se deberá elaborar a una temperatura inferior de 100°C y en ningún caso se recalentara.

Para la compactación, se calentaran previamente el pisón y el molde hasta que se uniformicen a la temperatura de mezclado, se llena éste con la mezcla caliente y se le aplicarán 50 golpes con la pesa deslizante del pisón por cada cara. Esto para aquellas mezclas diseñadas para recibir presiones de contacto que no excedan de 7 kg/cm², mientras que para la mezclas que se estiman recibirá de 7 a 14kg/cm² de presión se le darán 75 golpes por cara.

La mezcla se retirara del molde hasta que haya alcanzado la temperatura ambiente. Los especímenes compactados deberán tener una altura de 63.5mm con una tolerancia de 3.2mm.

Prueba de los especímenes.

La prueba de los especímenes comprende la determinación del peso volumétrico y de los valores de estabilidad y de flujo.

Los valores de estabilidad y de flujo se obtienen ensayando los especímenes en la prensa Marshall a una temperatura de 60°C con tolerancia de 0.50°C. Para ello se coloca el espécimen entre las dos secciones de la cabeza de prueba y se centra el conjunto en la máquina de compresión y se le aplica la carga a una velocidad de 50mm por minuto hasta que ocurra la falla del espécimen.

La carga máxima aplicada para producir la falla del espécimen se registra como el valor de estabilidad Marshall, mientras que el flujo corresponde a la deformación sufrida por el espécimen.

Para obtener el resultado se promedian los valores de estabilidad y flujo de los tres especímenes elaborados con el mismo contenido de asfalto.

Determinación del contenido óptimo de asfalto.

- Se calcula el promedio del peso volumétrico de los especímenes de prueba elaborados con un mismo porcentaje de asfalto.
- Se calcula la densidad teórica máxima y el porcentaje de vacíos para cada contenido de asfalto.
- Se calcula la relación entre el volumen ocupado por el asfalto y el volumen total de huecos que existiría, si el material pétreo no absorbiera asfalto.

$$V_o = \frac{D_r \times P_a \times \gamma}{100D_r \times D_a - (100 - P_a)\gamma \times D_a}$$

$$V_o = \frac{\text{Volumen_de_asfalto}}{\text{Volumen_total_de_huecos}}$$

Donde:

V_o = Vacíos ocupados por asfalto.

D_r = Densidad relativa aparente del material pétreo.

γ = Peso volumétrico del espécimen, en gramos por centímetro cúbico.

D_a = Densidad relativa del cemento asfáltico (aproximadamente 1.03).

P_a = Porcentaje de cemento asfáltico con relación al peso de la mezcla.

- Se dibujan las siguientes gráficas:
 - Peso volumétrico – contenido de asfalto.
 - Estabilidad – contenido de asfalto.
 - Flujo – contenido de asfalto.
 - Porcentaje de vacíos – contenido de asfalto.
 - Vacios ocupados por asfalto (V_o) – contenido de asfalto.

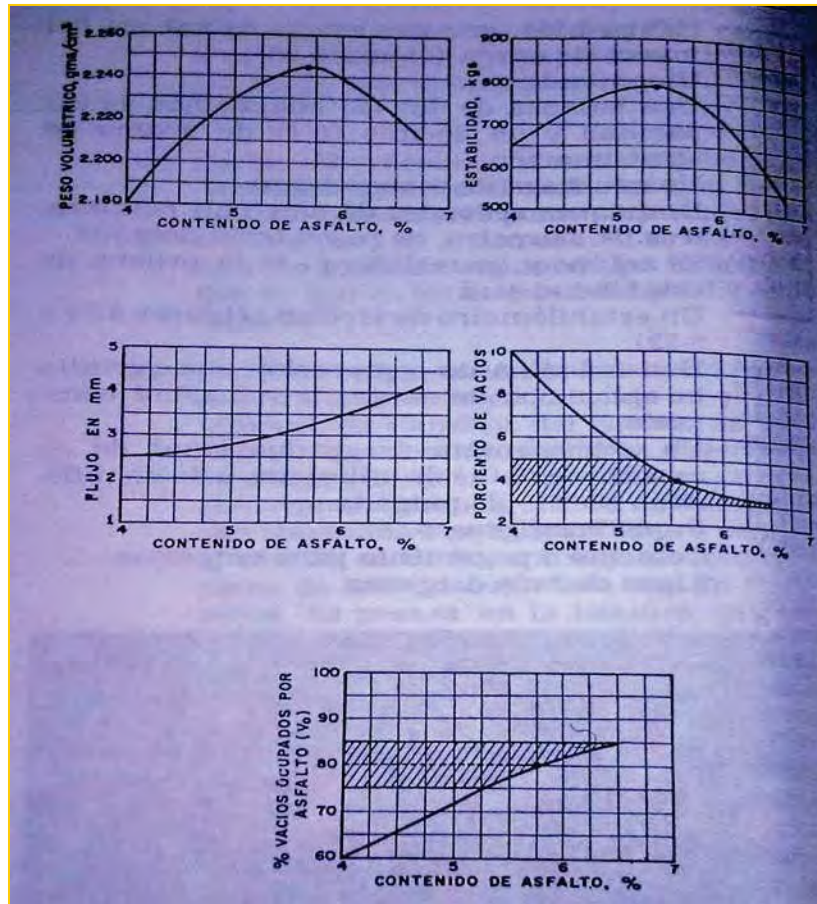


Fig. 4.22: Gráficas para determinar el contenido óptimo de asfalto por la metodología Marshall.

- De las gráficas anteriores, se calcula el contenido óptimo de asfalto, promediando los siguientes valores:
 - El contenido de asfalto que corresponde al mayor peso volumétrico.
 - El contenido de asfalto que corresponde a la máxima estabilidad.
 - El contenido de asfalto que corresponde al valor medio del porcentaje de vacíos de la tabla que se muestra adelante.

El contenido de asfalto que corresponde al valor medio del porcentaje de vacíos ocupados por el asfalto.

Se recomienda que la mezcla cuyo contenido de cemento asfáltico corresponda al promedio de los valores anteriores, reúna los requisitos que se dan en la tabla siguiente:

Tabla 4.6: Recomendaciones de calidad para mezclas diseñadas con el procedimiento Marshall. Fuente: Normas de Construcción de la SCT, 1981.

	Tipo de mezcla	Presión de contacto de las llantas	
		7 kg/cm ²	14kg/cm ²
Estabilidad		225 kg	450 kg
Flujo máximo		4 mm	5 mm
Porcentaje de vacíos	Con agregados de tamaño máximo de 19.05 mm. (3/4")	3 - 5	3 - 5
	Con agregados de tamaño máximo de 6.35 mm. (1/4")	5 - 7	6 - 8
Porcentaje de vacíos ocupados por asfalto	Con agregados de tamaño máximo de 19.05 mm. (3/4")	75 - 85	75 - 82
	Con agregados de tamaño máximo de 6.35 mm. (1/4")	65 - 75	65 - 72

Tabla 4.7: Requisitos de calidad para mezclas diseñadas con el procedimiento Marshall.
Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1957.

Características	Uso de la mezcla asfáltica elaborada con cemento asfáltico		Tránsito diario en ambos sentidos		Para aeropistas
			Hasta 2000 vehículos pesados	Más de 2000 vehículos pesados	
Número de golpes por cara			50	75	75
Estabilidad mínima, kg.	Para carpetas, capas de renivelación, bases asfálticas y bacheo.		450	700	700
Flujo, en milímetros			2-4.5	2-4	2-4
Por ciento de vacios en la mezcla, respecto al volumen del espécimen.	Para carpetas y mezclas de renivelación.		3-5	3-5	3-5
	Para bases asfálticas.		3-8	3-8	3-8
Por ciento de vacios en el agregado mineral (VAM), respecto al volumen del espécimen de mezcla, de acuerdo con el tamaño máximo del material pétreo mínimo.	Para carpetas, capas de renivelación, bases asfálticas y bacheo.	4.76 mm Núm. 4	18	18	18
		6.35mm (1/4)"	17	17	17
		9.51mm (3/8")	16	16	16
		12.7mm (1/2")	15	15	15
		19.0mm (3/4")	14	14	14
		25.4mm (1")	13	13	13

Se consideran como vehículos pesados los camiones en todos sus tipos y los autobuses.

Desafortunadamente el procedimiento de compactación en laboratorio por impacto no simula la densificación de la mezcla que ocurre con el paso de los compactadores lisos y neumáticos, así como bajo el tránsito en un pavimento real. De manera similar la estabilidad y el flujo no son representativos de las condiciones reales a las que es sometida la mezcla asfáltica.

➤ *Método de Hveem.*

El procedimiento de diseño de mezclas Hveem fue desarrollado por Francis Hveem, en su época Ingeniero en Materiales e Investigación del California Department of Transportation.

El método Hveem implica análisis de densidad/vacios y de estabilidad, así como la determinación de la resistencia de la mezcla al hinchamiento por la presencia de agua. Las principales ventajas del método es el empleo del procedimiento de compactación por amasado que representa de manera general la densificación de un pavimento real.

El principio del método Hveem es que en un material pétreo graduado al que se le han incorporado diferentes cantidades de asfalto, la resistencia ofrecida por las mezclas ya compactadas a los esfuerzos laterales que se provocan al aplicarse una carga vertical, es función de la cantidad y tipo de asfalto incorporado a la mezcla, y del acomodo y características de las partículas del material pétreo. La mezcla asfáltica compactada dentro de un molde, transmite a éste lateralmente una cierta fracción de la presión vertical aplicada. Dicha presión lateral varía inversamente con la resistencia interna de la mezcla. Las presiones laterales se miden por medio del Estabilómetro de Hveem para determinar el porcentaje de estabilidad correspondiente a la mezcla ensayada. Los porcentajes de estabilidad varían de cero a cien, en donde el valor cero corresponde a un líquido y el valor de cien a un cuerpo rígido que no transmite presión lateral.

El cohesiómetro es el dispositivo que se utiliza para medir la resistencia cohesiva de la película asfáltica que recubre al agregado pétreo, sujetando a un esfuerzo de flexión al mismo espécimen utilizado para medir la estabilidad. La prueba de expansión es un índice de la resistencia de una mezcla asfáltica compactada, al reblandecimiento y desintegración provocados por el agua. De esta manera el contenido óptimo de asfalto será el porcentaje máximo que admita la mezcla sin perder estabilidad.

Se dibujan las graficas:

- Peso volumétrico – proporción de asfalto.
- Porcentaje de vacíos de la mezcla – proporción de asfalto.
- Valor del cohesiómetro – proporción de asfalto.
- Estabilidad relativa – proporción de asfalto.
- Porcentaje de vacíos del material pétreo – proporción de asfalto.

De cada gráfica se define cuál es el contenido de asfalto que mejor satisface los requisitos de proyecto, para cada una de las características que se graficaron y se promedian dichos contenidos.

Se define el contenido óptimo de asfalto ajustando el promedio determinado de tal manera que se cumplan con todos los requisitos del proyecto.

Tabla 4.8: Requisitos de calidad para mezclas diseñadas con el procedimiento Hveem.
Fuente: Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, 1957.

Características	Para carreteras		Para aeropistas	
	Tránsito diario en ambos sentidos en vehículos pesados.		Aviones con peso total en toneladas.	
	De 1000 a 2000	Más de 2000	Hasta 20	Más de 20
Valor del Estabilómetro mínimo	35	37	37	40
Expansión en mm, máxima.	0.76	0.76	0.76	0.76
Por ciento de vacíos en la mezcla, respecto al volumen del espécimen, mínimo.	4	4	4	4

Se consideran como vehículos pesados los camiones en todos sus tipos y los autobuses.

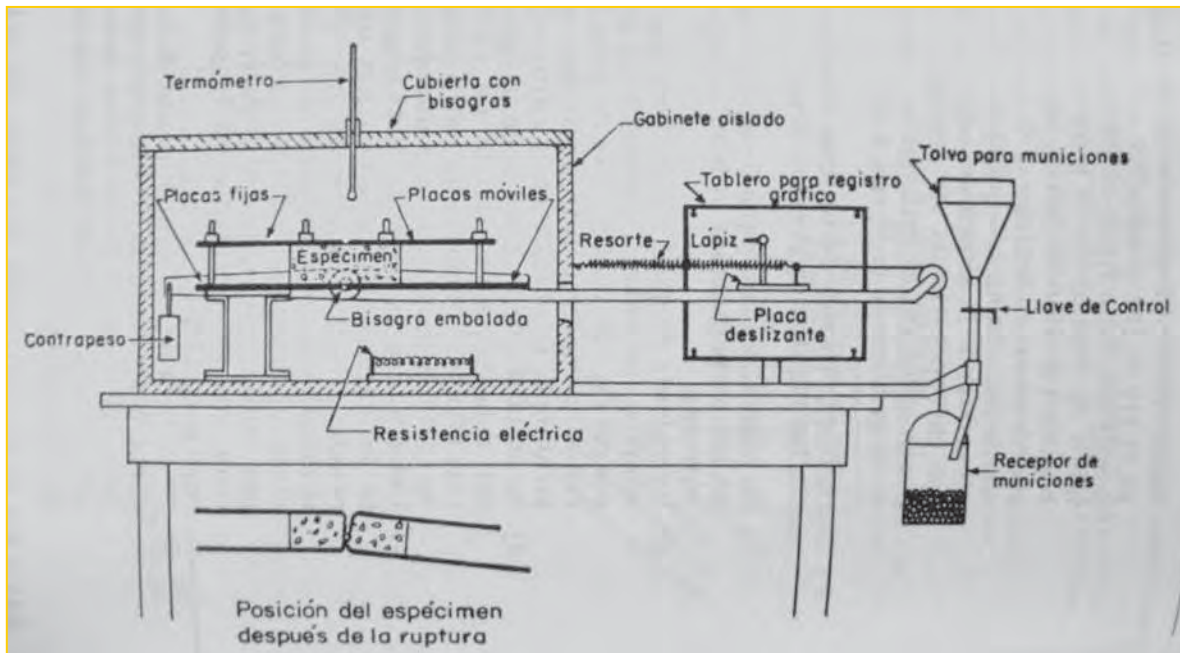


Fig. 4.23: Cohesímetro de Hveem

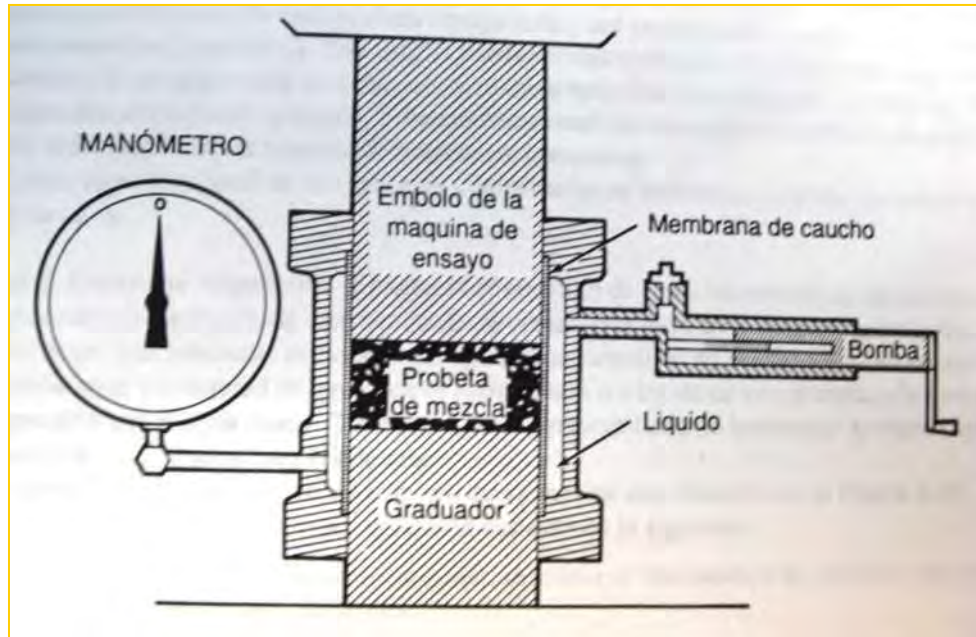


Fig. 4.24: Estabilómetro de Hveem.

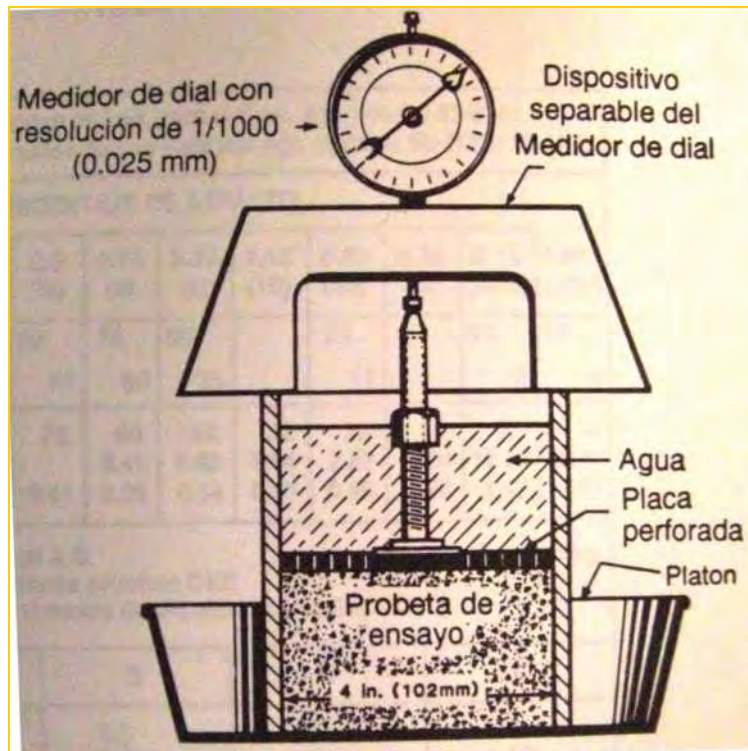


Fig. 4.25: Dispositivo para medir la expansión de Hveem.

5 Protocolo AMAAC

5.1 Introducción (Fuente: Dr. Paul Garnica, AMAAC)

No cabe duda que la ingeniería de pavimentos en México se debate en la actualidad ante la imperiosa necesidad de mejorar los procedimientos de diseño y construcción, con el objetivo último de lograr mejores desempeños de esas estructuras que permitan una optimización de los costos de mantenimiento y rehabilitación asociados y, sobre todo, de los costos de operación de los usuarios.

En la búsqueda de esos objetivos, las características de calidad de cada uno de los materiales que conforman un pavimento juegan un papel primordial, y de manera especial las relacionadas con la carpeta asfáltica que está directamente expuesta a las agresiones del medio ambiente y del tránsito vehicular.

Es por ello que, a iniciativa de la Asociación Mexicana del Asfalto, AMAAC, un comité técnico con especialistas tanto del sector privado como del público, incluyendo centros de investigación y Universidades, ha propuesto un protocolo para el diseño y control de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño.

Aunque muchos de los ensayos que se mencionan son ya de uso extensivo en nuestro País y otros se encuentran en su impulso inicial, en su conjunto representan ese cúmulo de experiencia, conocimiento y tecnología, que se requiere para realmente contribuir a una mejor infraestructura carretera para México.

En lo que sigue se describen brevemente los principales aspectos que conforman ese protocolo, se discute la pertinencia de la propuesta, su filosofía y resultados esperados.

Componentes del protocolo

La mezcla asfáltica es un material compuesto, formado por la conjunción de agregados pétreos y un cemento asfáltico, eventualmente con aditivos, cuyas propiedades mecánicas de resistencia, deformación y permeabilidad, estarán condicionadas a su vez por las propiedades particulares de cada componente en la mezcla.

Para su utilización en pavimentos carreteros, la mezcla asfáltica de alto desempeño debe ser resistente a las deformaciones plásticas, al fenómeno de fatiga y al daño por humedad, superando en comportamiento a las mezclas asfálticas convencionales.

El protocolo de diseño establece cuatro diferentes niveles de diseño para una mezcla asfáltica densa en función de la importancia de la carretera determinada por el nivel de tránsito esperado en el carril de diseño.

La secuencia de etapas que corresponde a cada uno de los niveles de diseño se muestra en la Tabla 5.1. Así entonces, el Nivel I incluye las primeras 6 etapas y el Nivel IV incluye todas.

El protocolo de diseño se completa con un segundo protocolo de control, que contiene los criterios para la ejecución del control de calidad que se deben cumplir para las mezclas de granulometría densa de alto desempeño diseñadas tal y como se indicó anteriormente. El control de calidad para la fabricación y aplicación de la mezcla asfáltica, es el conjunto de actividades que permiten evaluar las propiedades de los materiales y características de los equipos que se utilicen en su ejecución, comparándolas con las especificadas en el diseño, para decidir la aceptación, rechazo o corrección del trabajo y determinar oportunamente si el proceso de producción o el procedimiento de aplicación se está realizando correctamente o debe ser corregido. Las distintas etapas de control que se recomiendan se presentan en la Tabla 5.2.

Es importante resaltar que la Normativa actual de SCT, permite la inclusión de métodos y procedimientos que, aunque no formen parte de ella en la actualidad, estén debidamente sustentados técnicamente y sean aprobados por la autoridad competente. Este protocolo cuenta con el aval de las Direcciones de Servicios Técnicos, Conservación y Carreteras Federales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes para ser usado como especificación particular en los proyectos de carreteras.

Tabla 5.1: Etapas contempladas en cada uno de los niveles de diseño de una mezclas asfáltica de granulometría densa de alto desempeño.

NIVEL I. Tránsito bajo. Menos de 1 millón de ESALS	NIVEL II. Tránsito medio. De 1 a 10 millones de ESALS	NIVEL III. Tránsito alto. De 10 a 30 millones de ESALS.	NIVEL IV. Tránsito muy alto. Más de 30 millones de ESALS Selección de los agregados pétreos. La totalidad del material deberá ser obtenido por trituración. Granulometría de la mezcla. Su selección depende de la función requerida para la capa asfáltica en la estructura de un pavimento. Calidad de los agregados pétreos tanto para la fracción gruesa como para fracción fina. Selección del cemento asfáltico en base a su Grado de Desempeño PG. Incluye ensayos de envejecimiento a corto y largo plazo. Diseño volumétrico. Fabricación de los especímenes en el compactador giratorio. El contenido de asfalto óptimo será el necesario para obtener un porcentaje de vacíos de aire del 4%. Susceptibilidad de la resistencia de la mezcla al daño inducido por humedad. Los ensayos son de tensión indirecta. La relación entre las resistencias húmeda y seca deberá ser al menos del 80%. Susceptibilidad de la mezcla a la deformación permanente. Se podrán usar indistintamente la rueda carga de Hamburgo, el Analizador de Pavimentos Asfálticos, APA, o la pista española. Permite minimizar los problemas de roderas. Los ensayos se realizan en especímenes compactados una vez determinada la fórmula de trabajo. Módulo dinámico. Es un parámetro esencial para poder calcular los espesores de carpeta asfáltica en los nuevos métodos de diseño de pavimentos flexibles. Los ensayos se realizan en especímenes compactados una vez determinada la fórmula de trabajo. Fatiga. Se recomienda el ensaye de flexión en 4 puntos. Permite asegurar un número mínimo de repeticiones antes de la aparición del agrietamiento por carga repetida. Los ensayos se realizan en especímenes compactados una vez determinada la fórmula de trabajo.
---	--	--	---

Tabla 5.2: Prácticas recomendables para el control de calidad en campo de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño.

Control de trituración y verificación de calidad de los materiales pétreos y producto asfáltico	Controlar la trituración para que la granulometría de los materiales corresponda a la del diseño
	Verificar propiedades básicas de calidad de materiales cada 500 m ³ de material producido
	Poner especial cuidado en las pruebas de azul de metileno y adherencia con el asfalto
	Para el asfalto considerar penetración, recuperación torsional y recuperación elástica
Calibración de la planta de mezcla en caliente	Calibrar la planta para realizar el proporcionamiento de material pétreo y asfalto de acuerdo al diseño aprobado
Verificación de la calidad durante la producción	Determinar por cada 800 Ton de mezcla producida el contenido de asfalto, granulometría, humedad y propiedades volumétricas en campo
Pruebas de desempeño al inicio del proyecto en un tramo de prueba de 100 m	Realizar pruebas de desempeño en la mezcla tendida con sus propiedades volumétricas. Verificar granulometría y contenido de asfalto.
Pruebas de alerta y control en corazoncillos de campo	De susceptibilidad a la humedad usando ensayos de tensión indirecta, la rueda de Hamburgo o el APA.
	Para deformación permanente usando rueda de Hamburgo, APA o pista española.
Cumplimiento de los criterios definidos en el diseño	Se aprueba el procedimiento constructivo y calidad de la mezcla. Se revisa consistencia de resultados a cada 5 km para Nivel IV, a cada 10 km para nivel III y a cada 15 km para los niveles I y II.
	Se verifican características superficiales. Mediciones de regularidad y fricción.
	Se actualiza el sistema de gestión de pavimentos
Falla en el cumplimiento de los criterios definidos en el diseño	Revisar el proceso para detectar origen del problema y corregir

Pertinencia de la propuesta

En la Fig. 5.1 se muestran algunos resultados de un ejercicio realizado con la aplicación del modelo de gestión HDM-4, a manera de ejemplo; en particular se presentan las curvas de evolución de la profundidad de rodera en 20 años, para un pavimento flexible con carpetas asfálticas convencional y de alto desempeño. En el caso que se presenta se ha establecido una estrategia de conservación que no permita a la profundidad de rodera pasar de un valor de 9 mm. Se observa claramente que la obtención de mejores comportamientos de la mezcla asfáltica, como los que se obtendrían con el protocolo propuesto, redundan en un menor número de intervenciones de conservación a lo largo del período de análisis. Similar comportamiento se observa para el agrietamiento por fatiga y para la regularidad superficial. En términos económicos, esto representa un ahorro cercano al 30% en los costos totales actualizados de conservación periódica para un periodo de análisis de 20 años.

En los esquemas actuales de concesión de carreteras, tanto en autopista de cuota como en los proyectos de prestación de servicios, PPS, en carreteras federales, el uso de mezclas asfálticas no puede sino beneficiar a los operadores, además de al público usuario que exige circular por vías con excelente prestaciones que minimicen sus costos de operación y, finalmente, contribuyan a una mayor eficiencia del transporte nacional.

En carreteras federales, los beneficios del uso de mejores mezclas asfálticas en términos de desempeño son evidentes en los tramos con los niveles altos y muy altos de tránsito vehicular, más aún si se considera que los recursos de construcción y mantenimiento son públicos en su totalidad.

Las administraciones de redes estatales y municipales, que incluyen los ejes principales de las zonas urbanas y suburbanas, deberán evaluar sus políticas y expectativas en la funcionalidad deseada de su red carretera.

Varias son las empresas en México que cuentan ya con la tecnología de laboratorio necesaria y la capacidad técnica para asesorar en la implementación y capacitación que se requiera.

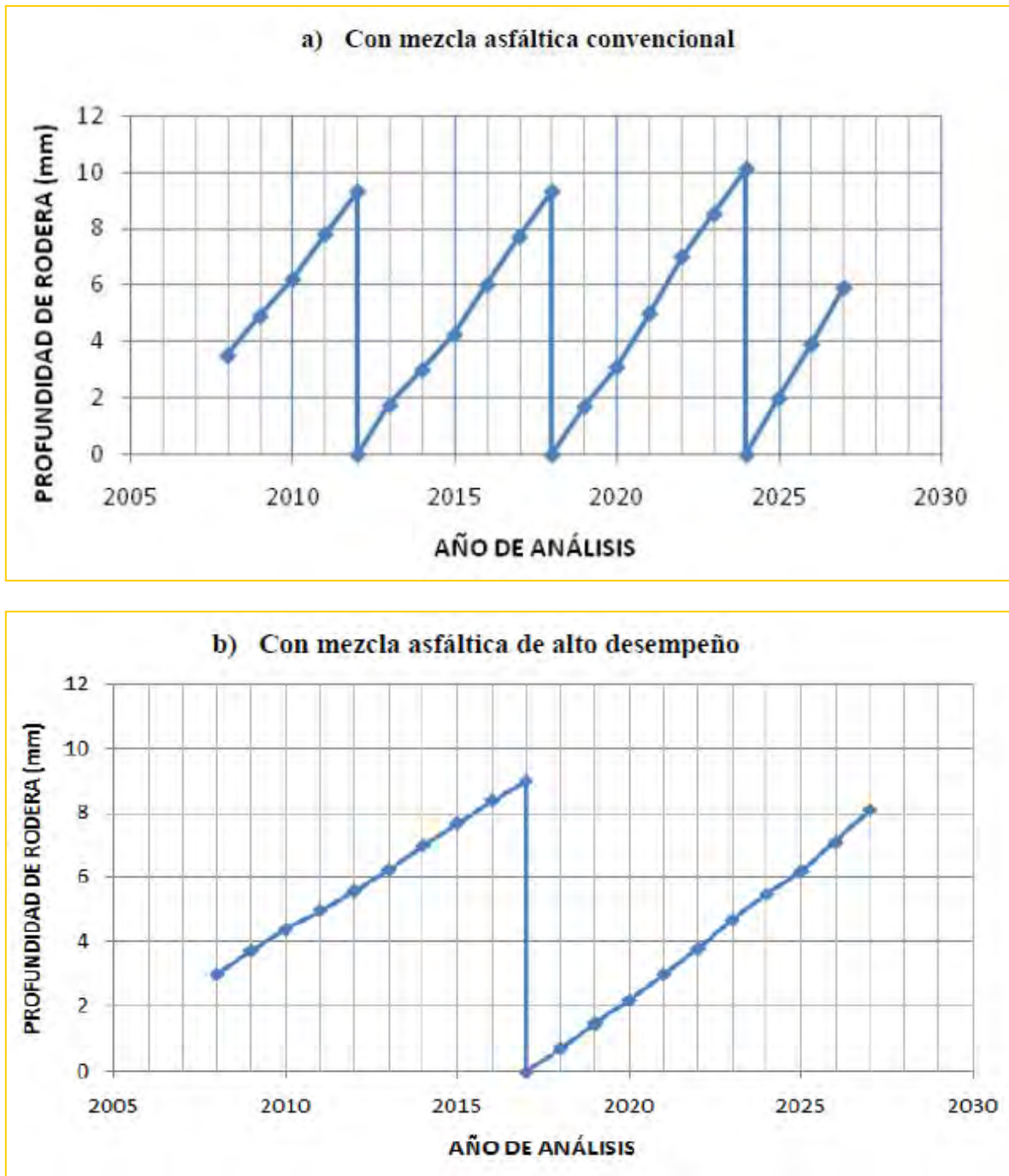


Fig. 5.1: Evolución típica de la profundidad de rodera en un pavimento flexible. Comparación entre carpetas asfálticas convencional y de alto desempeño.

6 Seguimiento del tramo de prueba para el *Protocolo AMAAC*, diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño, del km 13+000 al 17+000 de la carretera Sta. Rosa – La Barca en el estado de Jalisco.

6.1 Características generales del proyecto

El tramo Sta. Rosa – La Barca es un camino que comunica de manera libre de peaje a la metrópoli de Guadalajara con el centro del país; Irapuato, Salamanca, Celaya, Morelia, Querétaro, Puebla, Cd. De México, entre otras y viceversa. La Zona Metropolitana de Guadalajara es la región urbana resultante de la fusión de la ciudad de Guadalajara con otras localidades y ciudades aledañas, distribuidas en la superficie territorial de ocho municipios del estado de Jalisco, México. La economía de Guadalajara está activa en los tres sectores económicos que son los Primarios, Secundarios y Terciarios. Las actividades primarias se basan en el tránsito y comercio de ganado Bovino, Porcino, Ovino, Caprino, Equino, Avícola.

Las actividades secundarias se basan en las industrias textil y metalmecánica. Guadalajara es la capital industrial en el occidente de México y su sector industrial crece y se recupera rápidamente de los sucesos que a mediados de los años 1990. La industria alimenticia exporta la mayoría de sus productos (jugos, productos enlatados, dulces, salsas y alimentos en general), de estas exportaciones un 60% es nacional y el 40% restante se envía a Estados Unidos, donde los productos tapatíos son líderes en el mercado. En la industria farmacéutica Guadalajara juega el papel más importante en la producción nacional solo superada por el Distrito Federal y es uno de los mayores distribuidores en el país.

Por lo anterior se puede afirmar que el tramo Sta. Rosa – La Barca se encuentra localizado en una zona con una actividad industrial elevada. En él existe

por lo tanto un gran movimiento de materia prima y productos terminados a diferentes destinos.



Fig. 6.1: Macrolocalización del tramo Sta. Rosa – La Barca.



Tramo Sta. Rosa – La Barca km 13+000 al 17+000.

Fig. 6.2: Microlocalización.

La carretera Sta. Rosa - La Barca tiene un TDPA (Tránsito Diario Promedio Anual) de 15000 vehículos (Fuente: Bases de licitación SCT)) y dentro de este un porcentaje de vehículos pesados de 36.7 que al transitar sobre una estructura no apta para estos volúmenes de carga hacen que el pavimento existente tenga fallas estructurales y funcionales.



Fig. 6.3: Falla funcional por roderas presentada en el tramo.



Fig. 6.4: Falla estructural y funcional por deformación de carpeta y capas inferiores.



Fig. 6.5: Falla estructural por fatiga presentada en el Tramo.

Al observar las condiciones agresivas a las que es sometido el pavimento en el tramo Sta. Rosa – La Barca y al tener programada su ampliación a dos carriles por sentido, se eligió como tramo de prueba para el Protocolo AMAAC y llevar un seguimiento detallado con la finalidad de obtener algunos indicadores, principalmente, sobre el comportamiento y desempeño de la mezcla.

Los trabajos a realizar en el tramo son la ampliación a ambos lados del cuerpo existente de la carretera, la sección cuenta con un ancho variable de 12.00m, se contempla un ancho de corona de 21.00m que contará con una calzada de circulación de 14.00m de ancho con acotamientos externos de 2.50m a cada lado, y acotamientos interiores de 0.50m, así como una faja central de 1.00m, en esta última se alojara la barrera central.

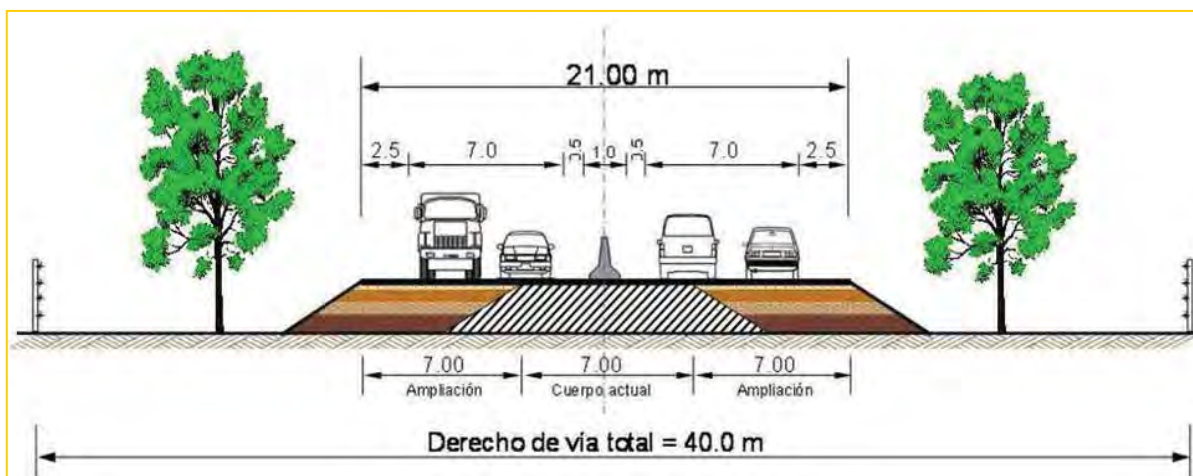


Fig. 6.6: Sección tipo.

La sección estructural del pavimento nuevo a considerar se conforma de una capa de base hidráulica de 0.30m, base asfáltica es de 0.20m y una carpeta de concreto asfáltico de granulometría densa de alto desempeño de 0.1 m, sin embargo en el transcurso de los trabajos se decidió por construir solamente 0.60m de carpeta asfáltica y 0.40m de mezcla asfáltica tipo SMA como capa de rodadura.

Las características generales del proyecto tomadas de los anexos de la convocatoria publicada por la SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes), que van referidas a la estructura del pavimento y que en caso de no cumplirse pueden afectar el comportamiento de la mezcla asfáltica densa se definen en el anexo I de este reporte.

6.2 Diseño de la mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño con el Protocolo AMAAC.

Se realizaron diseños de la mezcla por dos laboratorios diferentes, SemMaterials México y LASFALTO, en el presente documento se describirá únicamente el diseño de LASFALTO por ser el seleccionado por la empresa constructora como definitivo para llevarlo a cabo en la construcción. El diseño se realizó para el nivel III sin considerar Módulo Dinámico ya que en la fecha en la que se realizó el diseño no se disponía de ningún instrumento en México para realizar este tipo de prueba a los especímenes de diseño.

6.2.1 Selección de agregados pétreos

La selección del agregado pétreo se lleva a cabo tomando en cuenta dos características fundamentales; Granulometría y Calidad; la primera seleccionada de acuerdo a la función requerida para la capa asfáltica en la estructura del pavimento y con base en las necesidades del proyecto, para este caso se selecciono una mezcla de 19mm (3/4") la determinación de su composición granulométrica está en función del tamaño nominal de la mezcla y de su graduación, la cual debe estar dentro de ciertos puntos control; la segunda corresponde a las características físicas básicas que deben cumplir las fracciones gruesa y fina del agregado pétreo muestreado con base a pruebas de laboratorio, dividiendo el material en dos tipos: material grueso y material fino, cuyo objetivo principal es determinar su resistencia a diversas condiciones a las que se someten y también el encontrar la compatibilidad con el material asfáltico.

Los agregados a utilizar en el diseño serán los utilizados en la elaboración de la mezcla asfáltica en el tramo.

➤ *Calidad de agregado grueso***Tabla 6.1: Análisis de agregado grueso**

Ensayo	Resultado	Especificación
Material Grueso		
Desgaste de Los Ángeles, (%)	11	30% máx.
Intemperismo acelerado, (%)	1	15% máx.
Caras fracturadas (%)	100	90% mín.
Partículas alargadas (%)	0	Relación 3 a 1, 15% máx.
Partículas lajeadas (%)	4	Relación 3 a 1, 15% máx.
Densidad (T/m^3)	2.65	N.A.
Absorción (%)	1.14	N.A.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	95	90 min

➤ *Calidad de agregado pasa malla #4***Tabla 6.2: Análisis de agregado fino.**

Ensayo	Resultado	Especificación
Fino		
Equivalente de arena (%)	61	50% mín.
Azul de metileno (mg/g)	14	15% máx.
Densidad	2.43	N.A.

➤ *Granulometría***Tabla 6.3: Granulometría de los agregados pétreos.**

Malla	Agregado Grueso (% que pasa)	Agregado pasa malla #4 (% que pasa)
1"	100	100
¾"	92.0	100
½"	50.9	100
3/8"	9.8	100
Nº 4	0.3	100
Nº 8	0	79.8
Nº 16	0	47.6
Nº 30	0	29.7
Nº 50	0	22.5
Nº 100	0	16.9
Nº 200	0	13.2

Con las granulometrías de cada agregado pétreo se obtuvo mediante iteraciones la combinación del material en proporciones de 55% agregado Grueso, 45% agregado pasa malla #4, con la cual la granulometría resultante se encuentra dentro de los límites granulométricos que indica la especificación.

Tabla 6.4: Granulometría de diseño.

Malla (mm, in)		Granulometría Propuesta % que pasa
25	1"	100
19	¾"	95.6
12.5	½"	73.0
9.5	3/8"	50.4
4.75	Nº 4	45.2
2.36	Nº 8	35.9
1.18	Nº 16	21.4
0.6	Nº 30	13.4
0.3	Nº 50	10.1
0.15	Nº 100	7.6
0.075	Nº 200	6.0

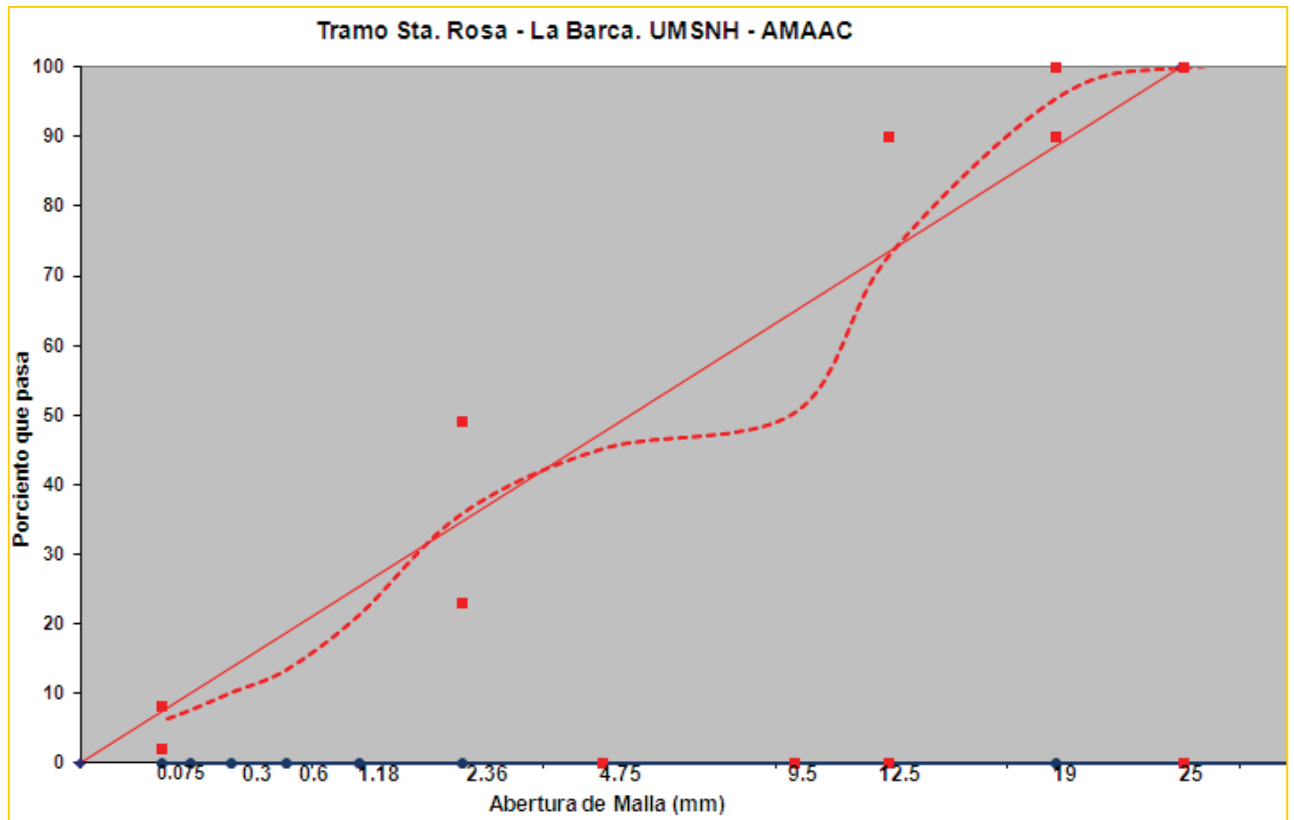


Fig. 6.7: Granulometría de diseño.

Como se puede apreciar todos los puntos se encuentran dentro de los parámetros establecidos por el Protocolo AMAAC (Puntos de control) para el tamaño máximo nominal de 19.0mm.

Se recomienda en el Protocolo considerar al menos tres granulometrías diferentes para dosificación y diseño de la mezcla. Las tres granulometrías pueden corresponder a las variaciones esperadas durante la producción en un cierto banco de materiales. Para el caso en cuestión se realizó solamente el diseño con una granulometría, más adelante se describirán las observaciones referentes a los cambios de esta a lo largo del proceso de elaboración de la mezcla en el tramo.

6.2.2 Selección del cemento asfáltico.

El cemento asfáltico grado PG (Performance Grade “grado de desempeño”) se seleccionó de acuerdo a la norma N-CMT-4-05-004/08 en función del clima, velocidad y nivel de tránsito.



Fig. 6.8: Zonas para definir el grado PG

La selección se realizó conforme a la zona correspondiente para la ciudad de Guadalajara (PG 64-22) y de acuerdo a un tránsito de entre 10 y 30 millones de ejes equivalentes se le realizan los ajustes correspondientes por intensidad de tránsito y por velocidad lenta, teniendo como resultado un asfalto PG 76 - 22.

Para cumplir con las características de un asfalto PG 76 – 22 se requiere someter el asfalto convencional a un proceso de mezclado con polímeros obteniendo un asfalto modificado.

Las temperaturas indicadas por el proveedor para el manejo del asfalto son las siguientes: Temperatura de mezclado recomendada: 165°C, Temperatura de compactación recomendada: 155°C.

6.2.3 Diseño Volumétrico.

Considerando que tenemos un volumen de agregado, un volumen de asfalto absorbido, un volumen de aire y un volumen de asfalto efectivo se tiene como objetivo particular que el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla asfáltica compactada sea de 4%, el valor óptimo para una mezcla de granulometría densa. Por lo tanto el contenido óptimo de asfalto será el necesario para obtener el porcentaje de vacíos de aire mencionados.

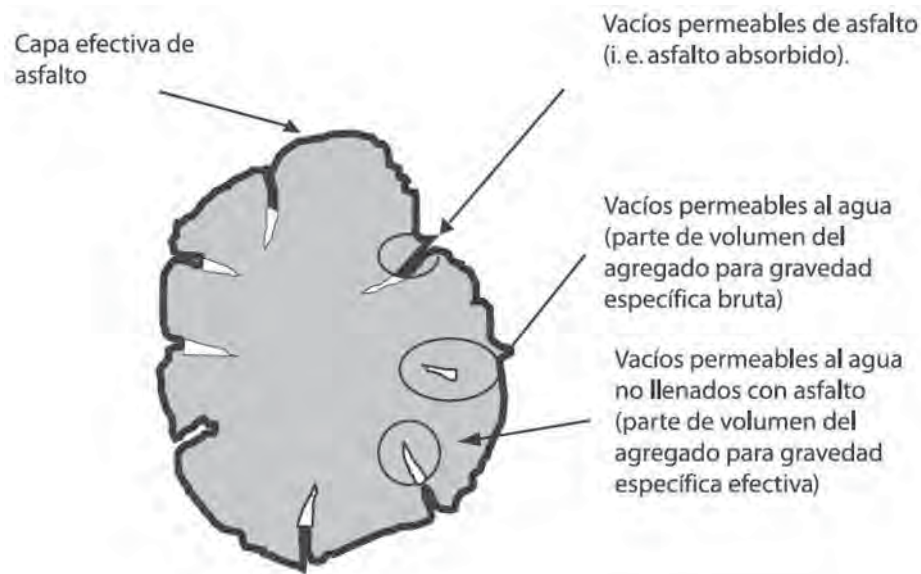
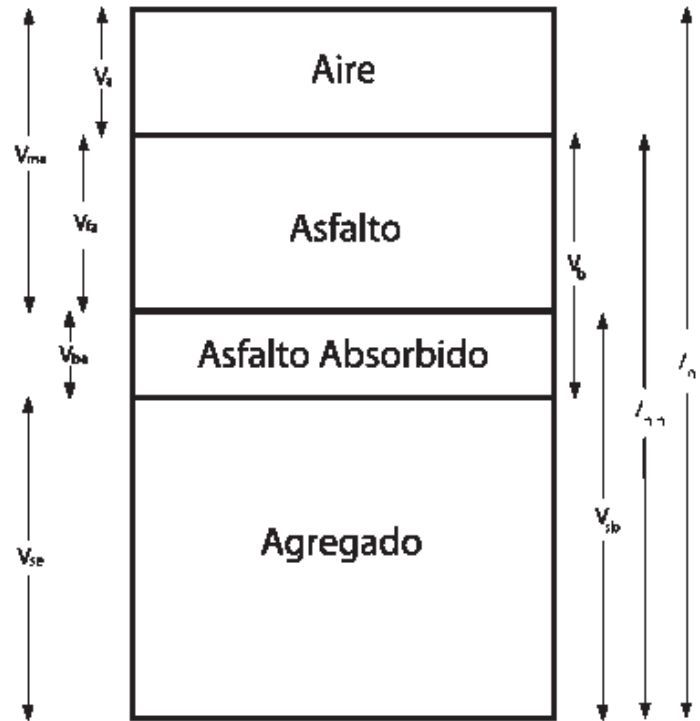


Fig. 6.9: Esquema para la determinación de las gravedades específicas en el agregado pétreo.



V_{ma}	Volumen de vacíos en agregado mineral.
V_{mb}	Volumen total de la mezcla asfáltica.
V_{mmb}	Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos.
V_{fa}	Volumen de vacíos llenados con asfalto.
V_a	Volumen de vacíos de aire.
V_b	Volumen de asfalto total.
V_{ba}	Volumen asfalto absorbido.
V_{sb}	Volumen total del agregado mineral.
V_{se}	Volumen efectivo del agregado mineral.

Fig. 6.10: Volúmenes presentes en una mezcla asfáltica.

La compactación se realiza por medio del compactador giratorio, para seleccionar el número de giros a aplicar para la obtención de los parámetros volumétricos se analizó la temperatura ambiente máxima durante 7 días del año en la ciudad de Guadalajara y de acuerdo a un tránsito de entre 10 y 30 millones de ejes equivalentes. Lo cual nos dice que se debe registrar el %Gmm (% de la gravedad específica teórica máxima) al Nini(9giros), %Gmm al Ndis(121giros) y %Gmm al Nmax(195giros).

Hay que aclarar que los parámetros de compactación de la mezcla asfáltica, mencionados en el párrafo anterior, se realizaron de acuerdo al SUPERPAVE,

mientras que el Protocolo AMAAC indica para un tránsito proyectado del carril de proyecto de 3 a 30 millones de ejes equivalentes (Nivel 3); el Nini es de 8, el Ndis de 100 y el N_{máx} de 160. Por lo tanto al obtener el porcentaje de Gmm a una pastilla a la cual se le sometió a una mayor cantidad de giros en el compactador giratorio no corresponderá a un diseño correcto. La especificación del Protocolo AMAAC menciona que para el Nini se debe obtener un porcentaje menor o igual de 90.5 de la Gmm, para el Ndis un 96% de Gmm y para el N_{max} un porcentaje del Gmm menor o igual al 98%.

Tabla 6.5: Resultados de diseño (*Obtenidos SUPERPAVE)

Porcentaje de asfalto	Gmm (gr/cm³)	Gmb (gr/cm³)	% Vacíos de aire	%VAM	%VF A	Relación filler asfalto	%Gmm Nini(9giros)*	%Gmm Nmax(195 giros)*
4.5	2.46 20	2.37 03	3.8	15.4	75. 3	1.1	87.4	97.5
Especificación AMAAC	N/A	N/A	Cerca no a 4.0	13mí n.	65- 78	0.6 – 1.2	Menor de 90.5%	Menor de 98%

$$Gmm = \frac{Pmm}{\frac{Ps}{Gse} + \frac{Pb}{Gb}}$$

Donde:

Gmm= Gravedad específica teórica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire).

Pmm= Porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100.

Ps= Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla.

Pb= Contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla.

Gse= Gravedad específica efectiva del agregado.

Gb= Gravedad específica del agregado.

$$Gmb = \frac{Wa}{W_{ss} - W_w}$$

Donde:

Gmb= Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 O D 2726).

Wa= Masa de la probeta de aire.

Ww= Masa de la probeta en el agua (sin parafina).

Wss= masa de la probeta saturada y superficialmente seca.

$$Va = 1 - \frac{Gmb}{Gmm} \times 100$$

Donde:

Va= Vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Como se puede apreciar el porcentaje de asfalto de 4.5% cumple con los requisitos indicados en el Protocolo AMAAC. Sin embargo el procedimiento y los parámetros de compactación no son los representativos al Protocolo AMAAC y por lo tanto la mezcla no está diseñada de acuerdo a este protocolo.

El siguiente paso es la determinación de la susceptibilidad al daño inducido por la humedad que se describe a continuación.

6.2.4 Susceptibilidad de la mezcla asfáltica al daño inducido por humedad.

Prueba que representa la resistencia de la probeta de mezcla asfáltica al daño inducido por humedad, también conocida como resistencia retenida. Es ensayada a tensión indirecta y previamente ha sido sometida a saturación, refrigeración y aumento de temperatura.

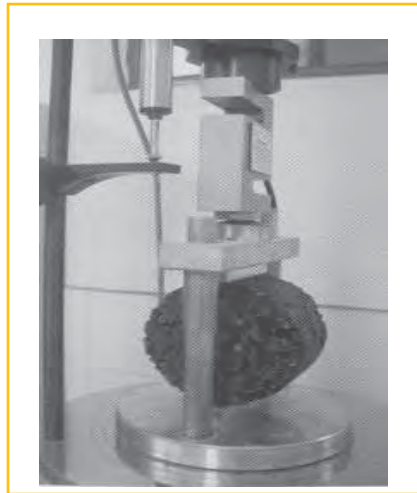


Fig. 6.11: Prueba de tensión indirecta.

Este procedimiento es equivalente a la prueba AASHTO T-283 y a la Recomendación AMAAC RA 04/2008 para verificar la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas. En el cual la resistencia retenida (TSR), debe ser mayor a 80%, para asegurar que la mezcla asfáltica no tendrá problemas de susceptibilidad a la humedad.

Tabla 6.6: Resultados de susceptibilidad a la humedad

Tipo de asfalto	%TSR
PG 76	94

Las mezclas con asfalto modificado PG 76 -22, tienen buen comportamiento a la susceptibilidad a la humedad, como se muestra en la Tabla 6.6, ya que tienen un %TSR mayor a 80%.

6.2.5 Susceptibilidad a la deformación permanente y al daño inducido por humedad.

➤ *Rueda Cargada de Hamburgo.*

En este dispositivo se mide la susceptibilidad a la humedad y a la deformación permanente por rodera de una mezcla asfáltica tendida y compactada. La deformación es provocada por el movimiento cíclico concentrado de una rueda metálica cargada y su objetivo es el prevenir deformaciones permanentes y baches mediante la identificación de mezclas asfálticas con estructura mineral deficiente y susceptible al desgranamiento causado por la falta de adherencia entre el asfalto y el agregado pétreo que podría provocar un desempeño deficiente de la capa asfáltica. El ensaye se realizo de acuerdo al procedimiento de la Recomendación AMAAC RA-01/2008.

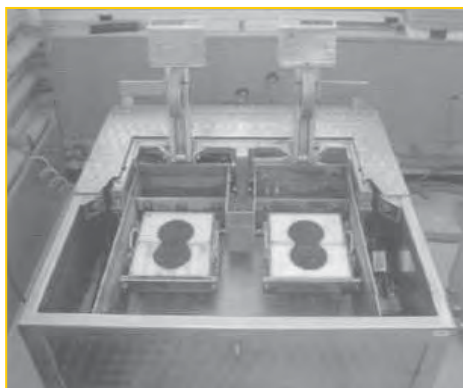
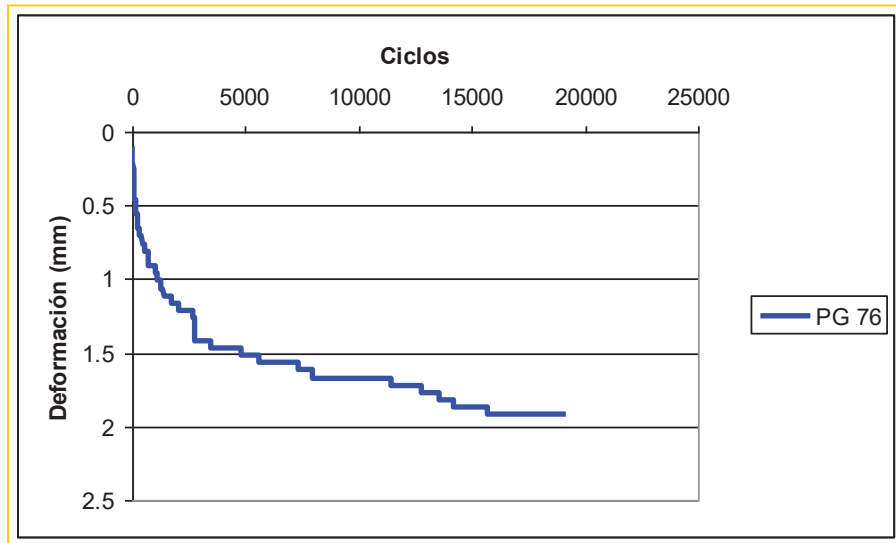


Fig. 6.12: Rueda cargada de Hamburgo.

A continuación, en la Fig. 6.13 se muestra la deformación que tuvieron en la rueda de Hamburgo las probetas de diseño fabricadas con asfalto PG 76 – 22 y con el pétreo de diseño, mientras que en la Tabla 6.7 se indica la deformación obtenida y la especificación para el tipo de asfalto de proyecto.

Tabla 6.7: Resultados de rueda de Hamburgo del asfalto A.

Tipo de asfalto	N° ciclos	Deformación (mm)
PG 76	20,000	1.92
Especificación	20,000	10.0 máx.

**Fig. 6.13: Ensayo en rueda de Hamburgo.**

Se puede observar en la Tabla 6.7 y Fig. 6.13, que la mezcla diseñada con el asfalto PG 76 - 22, funciona adecuadamente, de acuerdo a lo que pide la norma en el ensayo de deformación en Rueda de Hamburgo.

6.2.6 Módulo dinámico.

El módulo dinámico es requerido para el diseño del pavimento y determinar los espesores de cada una de las capas de manera certera ya que en la actualidad este parámetro es obtenido según las experiencias en otros países y de manera teórica. Lo anterior ocasiona que en los diseños de pavimentos que se realizan hasta el momento haya gran incertidumbre en cuanto a su resistencia.

Al momento en que se elaboro el diseño no se tenían en México equipos disponibles para determinar módulos dinámicos por lo que no se realizo esta prueba.

6.2.7 Resumen del diseño de la mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño.

%Cemento asfáltico óptimo: 4.5

Gravedad específica máxima teórica de la mezcla sin compactar: 2.462

Gravedad específica de la mezcla compactada: 2.3703

% Vacíos de aire en la mezcla compactada: 3.8

% VAM: 15.4

% VFA: 75.3

%TSR (AASHTO T-283) ASFALTO PG 76: 94

Deformación rueda cargada de Hamburgo, asfalto PG 76 (mm): 1.92

Temperatura de mezclado recomendada: 165°C

Temperatura de compactación recomendada: 155°C

Con fines informativos y de comparación se menciona el resumen de resultados obtenidos por SemMaterials.

Proporción de agregados en peso: 20% de grava, 25 % de sello y 55% de arena.

Contenido de asfalto: 4.64 % base peso de la mezcla o 4.86 % base peso del agregado.

Temperatura de mezclado: 160 a 175°C.

Temperatura de compactación: 150 a 165°C

Gravedad específica de la mezcla compactada: 2.328

Gravedad específica máxima teórica de la mezcla sin compactar: 2.425

Vacíos de aire en la mezcla compactada: 4.0%.

% VAM: 13.56.

% VFA: 70.5

Relación de filler: 1.78

TSR: 92.3%.

Deformación en Hamburgo: 1.7 mm.

Es importante aclarar que el diseño elaborado por SemMaterials está basado en tres tipos de materiales pétreos; del mismo banco pero con diferente granulometría, mientras que LASFALTO desarrollo su diseño solamente con dos tipos de pétreos. Sin embargo no se aprecian diferencias considerables entre los parámetros. Se desconoce el procedimiento que realizo la empresa constructora para elegir el diseño a emplear.

6.3 Reporte general del seguimiento en obra.

El presente reporte se compone de dos secciones; la primera en donde se describe de manera general el procedimiento constructivo utilizado por la empresa encargada de la obra, las acciones de control de calidad y la labor de la supervisión por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) Jalisco, todo ello respaldado con fotografías para un mejor entendimiento. En la segunda sección se expone específicamente la calidad de la mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño de diseño, reportando fundamentalmente las características de granulometría, densidad, porcentaje de vacíos y espesores. Lo anterior se analizará con un enfoque analítico sobre las posibles afectaciones al desempeño de la mezcla asfáltica.

6.3.1 Reconocimiento del sitio.

El día 02 de octubre de 2009 se realizó una reunión que tuvo lugar en el centro SCT del estado de Jalisco a la cual asistieron personas involucradas e interesadas en los tramos de prueba y el comportamiento mismo de la mezcla diseñada con el Protocolo AMAAC. La reunión tuvo como objetivo hacer la presentación formal del tramo de prueba Sta. Rosa – La Barca, así mismo se describieron a grandes rasgos las características del proyecto. Otro punto importante a tratar fueron los resultados obtenidos del tramo de prueba construido en el estado de Nuevo León.

Terminada la reunión se realizó una visita al lugar de la obra en donde se describió brevemente el proyecto y el procedimiento constructivo planeado. Durante la visita se observaron las diferentes etapas que la empresa constructora se encontraba atacando, que son: construcción de obras de drenaje, terracerías, recuperación de pavimento existente, conformación de base hidráulica y elaboración y tendido de base asfáltica. Es importante mencionar que la empresa constructora decidió comenzar varios frentes de ataque y por ello la gran diferencia de avances que se tienen en las distintas etapas.

Con lo que se refiere a los materiales; se visitó el banco de material pétreo triturado GRAVASE que de acuerdo con el catálogo de bancos de material de SCT cumple con las calidades para ser utilizado en base hidráulica y mezcla asfáltica. Para la base asfáltica se utiliza un TMA de 1 ½" mezclado con asfalto AC 20, para la mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño se utiliza pétreo con TMA de ¾" mezclado con un asfalto PG 76–22 suministrado por AMMEX que garantiza la calidad del asfalto entregado siempre y cuando los sellos del carro tanque no estén violados.



Fig. 6.14: Carro de AMMEX descargando PG 76-22.

El material pétreo es un basalto triturado, los frentes de extracción de material son cinco y están clasificados según la profundidad de la roca (Fig. 6.15) mientras el material este más expuesto a la superficie es de menor calidad y tiene mayor cantidad de materia orgánica que entra de la superficie por medio de las diaclasas de la roca con ayuda del agua, de manera general, los dos primeros niveles de extracción que son los de menor calidad se utilizan para la elaboración de la base hidráulica y los tres restantes se emplean para la mezcla asfáltica, ya sea base o mezcla densa, variando su granulometría según corresponda.



Fig. 6.15: Banco GRAVASE; al fondo se observa el frente de extracción, a la derecha se observa la trituradora con sus respectivas bandas que clasifican el material según el tamaño.



Fig. 6.16: Fresado de pavimento existente inadecuado y puede provocar agrietamiento longitudinal en el pavimento nuevo a largo plazo por el fenómeno de reflexión de grietas.



Fig. 6.17: Espesor de 2ª capa de base asfáltica de 4.5cm en el km 14+320 lado derecho.

6.3.2 Materiales

➤ Pétreo

Se corroboraron las características del agregado pétreo de diseño en el laboratorio de la UMSNH obteniendo valores equivalentes, sin embargo se enviaron muestras de filler al laboratorio PROLASA con la finalidad de que determine el valor de azul de metileno y corroborarlo con el diseño pues en el laboratorio de asfaltos de la UMSNH no se dispone de estos reactivos. El resultado obtenido fue de 16 mg/g siendo la especificación de 15 mg/g máximo en capas estructurales.

De manera general el material se ha mantenido homogéneo, solamente con unos pequeños cambios que se presentan en la granulometría en comparación con la de diseño.

➤ *Asfalto*

La calidad del asfalto está garantizada por la empresa AMMEX, sin embargo el laboratorio interno de la empresa constructora obtiene muestras en cada descarga de las pipas para corroborar que el asfalto sea de buena calidad, las características del asfalto que se determinan en el laboratorio interno son las mencionadas en la normativa para caracterizar el cemento asfáltico modificado. De tal manera que no se da el seguimiento adecuado para determinar el grado de calidad según su grado de desempeño. Durante la producción de mezcla asfáltica se obtuvo una muestra de asfalto modificado del carro tanque de AMMEX y se envió al laboratorio de PROLASA y con el uso del Reómetro de corte directo se determinó que el asfalto es apto para ser aplicado en temperaturas de 76°C por lo tanto se determina que corresponde a un PG 76 – 22.

6.3.3 Planta de mezclado

La planta de mezclado es del tipo de producción continua de flujo paralelo, la cual consta de tres tolvas para suministro de material pétreo, tambor secador y mezclador, carro tanque en el cual se almacena el asfalto a utilizar y banda transportadora para la carga del camión, sin embargo tiene un gran inconveniente, no tiene recuperador de polvos lo que ocasiona una gran pérdida de filler (material que pasa la malla No. 200) durante el mezclado.

La calibración de la planta para la elaboración de la mezcla densa se realizó los días 24 y 26 de octubre de 2009 con el siguiente procedimiento: se calibró la planta para material frío y sin asfalto hasta cumplir con la granulometría de diseño, sin embargo al momento de activar todo el circuito de la planta no se obtuvieron resultados favorables, pues la granulometría de la mezcla elaborada no corresponde a la de diseño, motivo por el cual se modificó la calibración hasta obtener la granulometría de diseño en la mezcla.



Fig. 6.18: Trabajos de calibración de la planta el día 24 de octubre de 2009

Es muy importante mencionar que para el primer lote de mezcla densa se dejó el carro tanque lleno de asfalto modificado aproximadamente durante ocho (8) días a una temperatura de 180°C , sin realizar ninguna prueba de sedimentación para verificar que no haya ocurrido este fenómeno físico, es muy poco probable que el asfalto haya sufrido envejecimiento considerable durante estos días, pues no ha estado en contacto con el oxígeno.



Fig. 6.19: Planta de mezcla asfáltica de producción continua y flujo paralelo, sin recuperador de polvos.

➤ *Tolvas para suministro de material pétreo.*

Consta de tres tolvas, sin embargo para la mezcla densa solamente se utilizan dos, tolva para material de $\frac{3}{4}$ " y otra para la arena, para la base asfáltica trabajan las tres tolvas agregando en la tercera el material de $1\frac{1}{2}$ ".

De manera general se puede decir que la cantidad de tolvas empleadas para la elaboración de la mezcla asfáltica es la adecuada, teniendo en cuenta que se suministran dos tipos de materiales y con estos se realizó el diseño, Sin embargo esto no garantiza la uniformidad del material pétreo suministrado.

Lo ideal sería que el diseño se hubiese realizado con mínimo de cuatro tipos de materiales y cada uno de ellos tenga una tolva especial para alimentar la planta de mezclado y así tener mayor certeza de la composición granulométrica suministrada.

Una observación muy importante es que el material de las tolvas no está completamente dividido y el error más común es que pase arena a la tolva del

material de $\frac{3}{4}$ ". Este error se ha encontrado en todas las visitas realizadas al tramo.



Fig. 6.20: Tolvas de material pétreo en frío. Se observa que hay traslado de materiales entre las diferentes tolvas.

Otro inconveniente relevante es que la alimentación de las tolvas hacia el tambor secador y de mezclado se realiza por volumen y el sistema de compuertas y bandas empleado puede generar que el volumen no se mantenga uniforme durante la operación. Un tipo de alimentación adecuado es el suministro de material por peso que garantiza el suministro de la porción adecuada de cada granulometría hacia el tambor secador.

➤ *Carro tanque*

El asfalto modificado PG 76 -22 se mantiene a una temperatura de 160° C, por lo general inmediatamente que se suministra el asfalto la planta comienza a producir mezcla densa hasta que se termine o surja algún inconveniente, a excepción de la puesta en marcha de la planta para la elaboración de la mezcla densa donde tardo el carro 8 días aproximadamente con el asfalto modificado.

El inconveniente que existe es que en la misma planta produce base asfáltica con AC 20 y mezcla densa elaborada con asfalto modificado sin que se

realice una correcta limpieza al momento de cambio de productos. Así cuando en el carro tanque se realiza un llenado con asfalto diferente al que contenía se forman grumos con la combinación de dos tipos diferentes de asfalto.

También el sistema de llenado no es el adecuado pues el tubo de suministro llega hasta la parte superior del tanque, lo que ocasiona que se rompan algunas natas del asfalto existente.

Para disminuir la mezcla del asfalto PG 76 – 22 con el AC 20 en el carro tanque, se ha optado por producir la mezcla densa descargando el asfalto modificado directamente del tanque de AMMEX, esto se facilita ya que la producción de mezcla densa la realizan por lo general en lotes pequeños que equivalen a uno o dos tanques de 40, 000 l de asfalto modificado.

➤ *Tambor secador y mezclador*

Existe una gran pérdida de finos cuando el pétreo entra al tambor, además no se le ha realizado ninguna tarea de limpieza y a ello se le atribuye que al calibrar la planta en seco proporcione una granulometría adecuada y equivalente a la de diseño, al momento de encender todo el mecanismo y obtener la mezcla elaborada, los componentes de esta no corresponden a lo necesario, por lo tanto fue necesario realizar otra calibración. Es de interés aclarar que la empresa encargada de la calibración de la planta aparentemente carecía de experiencia pues fue notable que entraron en grandes complicaciones al cumplir con su deber.



Fig. 6.21: Conglomerado de mezcla asfáltica fría detectado el día 27 de marzo de 2010 que se produce en el tambor mezclador por la falta de limpieza.

Al no realizar la limpieza necesaria en el tambor mezclador, se producen conglomerados de mezcla asfáltica en frío como los que se ven en las imágenes los cuales en un momento determinado salen del tambor junto con la mezcla elaborada, los terrones de gran tamaño son fácilmente detectados por los operadores de la planta de mezclado y son retirados, sin embargo en ocasiones se producen terrones de tamaños pequeños de aproximadamente 5cm de diámetro los cuales son tendidos y compactados junto con la mezcla densa. Estos materiales afectan la uniformidad de la capa y hacen que el lugar donde se encuentran sea un punto débil y se tenga falla prematura.



Fig. 6.22: Terrón de mezcla asfáltica detectado el 27 de marzo de 2010 con aproximadamente 35cm de longitud.

➤ *Banda transportadora*

La banda transportadora es un elemento fundamental para mantener una mezcla uniforme durante la carga, por lo general debe de ir suministrada con un dispositivo para carga del camión con la finalidad de disminuir la clasificación del mismo al tiempo de realizar la transición banda – camión. En este caso, la banda no estaba dotada de ningún dispositivo, además tiene mucho asfalto con fino adherido lo que ocasiona que la carga no sea uniforme, a esto le agregamos que los camiones no realizan los movimientos adecuados con la finalidad de que se cargue por etapas como se indica en la normativa de la SCT para el transporte de la mezcla elaborada.



Fig. 6.23: Banda transportadora con asfalto adherido y sin dispositivo de carga que provoca una clasificación del material.

En la Fig. 6.23 se observa claramente que al no mantener la banda limpia se le adhiere mezcla con finos que los suelta en su trayecto de regreso al tambor, además por el efecto de la gravedad y por el tipo de descarga de la banda, el material grueso siempre tiende a desplazarse más que el fino, por lo tanto en el camión y a la hora de tender se observa claramente que una parte del camión contiene mucho agregado grueso y la otra mucho agregado fino. Este problema se trato de solucionar el día 4 de enero de 2010 cuando se le agrego a la banda un dispositivo *casero* de carga con la finalidad de evitar los fenómenos mencionados anteriormente. Se obtuvieron resultados favorables y aunque la mezcla no se carga completamente uniforme se nota claramente la mejoría.



Fig. 6.24: Dispositivo de carga para evitar clasificación del material, implementado a partir del 4 de enero de 2010.



Fig. 6.25: Dispositivo de carga requerido para minimizar la clasificación del material, en plantas de producción continua.

➤ *Control de calidad en la planta de mezclado.*

En la planta se lleva un buen control de calidad revisando de manera periódica, aproximadamente cada 50m³ de producción, la temperatura de elaboración de la

mezcla (165 a 175° C), contenido de cemento asfáltico y la granulometría de la mezcla elaborada obtenida con el equipo conocido como rôtarex. También se toman muestras para la elaboración de especímenes y revisar sus propiedades volumétricas. El inconveniente en el control de calidad es que no representa las condiciones de diseño pues este último se realizó con el Protocolo AMAAC y el control de calidad se lleva a cabo con el método Marshall. Además la muestra se toma directamente de la planta y por lo mencionado en el apartado de banda transportadora, la mezcla obtenida al salir inmediatamente de la planta no corresponde a la que llega al tramo a tender.



Fig. 6.26: Revisión de la temperatura en mezcla densa (175°C)



Fig. 6.27: Control de calidad en mezcla densa con compactador Marshall.

6.3.4 Riegos de liga.

Los riegos de liga en general, ya sea para colocar base asfáltica o mezcla densa, se realizan de una manera muy deficiente y no cumplen con la normativa de la Secretaría. Aunque cumplen con la cantidad de emulsión indicada en las especificaciones particulares de la obra, 0.6 lt/m^2 , no cumplen con la uniformidad en el cubrimiento, pues la petrolizadora no dispersa la emulsión de manera adecuada, a pesar de que se le adaptaron nuevos aspersores con la finalidad de cumplir con la cantidad. Sin embargo deja visibles grandes franjas sin riego. Este problema se ha tenido durante toda la etapa de construcción.



Fig. 6.28: Riego de liga no cumple con el cubrimiento uniforme.

Al momento de extraer corazones de la mezcla asfáltica nos encontramos que en algunos lugares no hay ningún tipo de adherencia entre las capas de base y la de mezcla densa teniendo que recurrir a juntarlos con cinta adhesiva para poder conservar el espécimen, mientras que en otras zonas se presenta un exceso de asfalto en la liga.



Fig. 6.29: Corazones extraídos del tramo, se aprecia la falta de liga.

6.3.5 Tendido y compactado

El tendido se realiza inmediatamente que llega el camión, aproximadamente 10 minutos de salido de la planta de mezclado a una temperatura de 150 -170° C lo cual está conforme a la recomendación del productor del asfalto modificado. Sin embargo, se observa una gran clasificación de material y solamente se porea con la finalidad de ocultar lo que está debajo. Debido a la segregación de material es notable que en un lado de la faja de tendido sea material grueso y en el lado opuesto sea material fino. Adicionalmente, al rastrillar y retirar el agregado grueso sobrante, lo vuelven a colocar por delante de la pavimentadora.



Fig. 6.30: Tendido y rastrillado de mezcla densa.



Fig. 6.31: Clasificación de material en el camión, la mitad material grueso y la otra mitad material fino.



Fig. 6.32: Material en la tolva receptora de la pavimentadora muy clasificado.



Fig. 6.33: Montículos de material de desperdicio son colocados por delante de la pavimentadora para ser tendidos.



Fig. 6.34: Textura del material clasificado al tender.



Fig. 6.35: Objetos tirados que no son retirados al tender.

En cuanto a espesores de la mezcla densa son revisados continuamente, sin embargo en ciertos lugares existen irregularidades en el perfil desde la base hidráulica, por lo que se presentan errores considerables en los espesores de la base asfáltica y de la mezcla densa.

En la compactación se le dan 2 pasadas con el rodillo liso, 4 pasadas con el rodillo neumático y nuevamente 2 pasadas con el rodillo liso, esta acción se lleva a cabo inmediatamente después del tendido. No se realizó tramo de prueba alguno para determinar el número de pasadas con las que hay que compactar, por lo que hay que esperar los resultados de los testigos que se obtengan para determinar si la densidad alcanzada es la correcta.



Fig. 6.36: Equipo de compactación



Fig. 6.37: Equipo de barrido

6.4 Seguimiento de resultados de laboratorio.

Para la elaboración de esta sección se tomo la información obtenida de los análisis elaborados en los laboratorios de control de calidad de la empresa constructora, LASFALTO, PROLASA, Instituto Mexicano del Transporte y de la UMSNH, analizando el material pétreo, el asfalto, la mezcla asfáltica, así como espesores de las capas ya construidas, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos con las especificaciones particulares de la obra, de la normativa del IMT y lo especificado en el Protocolo AMAAC.

Para facilitar la planeación del proceso constructivo y de la toma de muestras para el control de calidad, el ancho total del camino se dividió en seis franjas, tal y como se muestra en la figura lo que proporciona información más exacta sobre el lugar en donde se tendió la muestra obtenida.

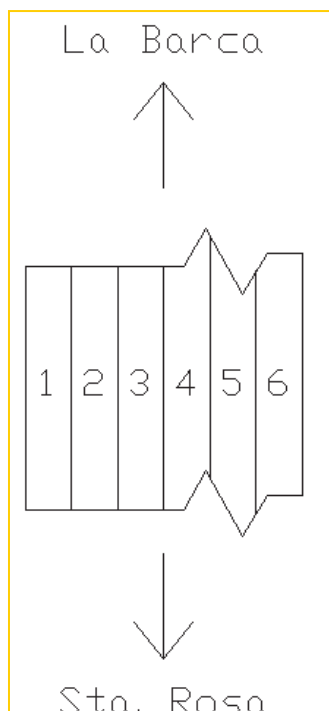


Fig. 6.38: Esquema de las franjas de construcción.

6.4.1 Calidad de la mezcla asfáltica

El objetivo de determinar la calidad de la mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño es el verificar que fue elaborada de acuerdo a las especificaciones que indica el diseño, así mismo de revisar los procedimientos utilizados para alcanzar esta calidad o no alcanzarla. Para los efectos de este trabajo se restringió a verificar la calidad final y no a llevar un control de calidad, ya que el control de calidad se basa en identificar los procesos que dan origen a variaciones en el producto para ser corregidos oportunamente.

A manera de características generales, en la Tabla 6.8 se indica la relación de la muestra de mezcla asfáltica, la fecha, el lugar de tendido y la temperatura a la que fue mezclada, tendida y compactada. Recordemos que la recomendación es temperatura de mezclado 165°C y 155°C para compactación.

Tabla 6.8: Temperaturas de mezclado, tendido y compactado.

Muestra	Fecha	Cadenamiento	Franja	Temperatura (°C)		
				Mezclado	Tendido	Compactación
1	13/11/2009	13+750	3	165	159	152
2	13/11/2009	13+670	4	161	154	143
3	14/11/2009	13+930	4	175	170	168
4	18/11/2009	13+390	6	170	161	156
5	18/11/2009	13+920	6	169	167	153
6	19/11/2009	13+980	2	165	150	141
7	19/11/2009	13+060	2	170	163	151
8	20/11/2009	13+580	1	172	168	160
9	19/12/2009	14+200	4	170	166	163
10	20/12/2009	14+180	6	166	166	161
11	21/12/2009	15+250	4	170	164	160
12	22/12/2009	15+020	6	166	162	157
13	22/12/2009	15+200	2	168	162	160
14	23/12/2009	15+290	1	165	160	158
15	22/01/2010	16+850	4	168	164	160
16	22/01/2010	16+390	4	174	168	166
17	25/01/2010	16+600	5	174	172	170
18	29/01/2010	16+850	3	180	176	174
19	01/02/2010	16+420	3	162	160	156
20	04/02/2010	16+490	6	168	166	158
21	05/02/2010	16+810	6	174	168	166
22	11/02/2010	16+700	2	164	162	160
23	12/02/2010	16+280	2	164	162	160
24	12/02/2010	16+860	1	164	160	158
25	13/02/2010	16+000	3	166	164	162
26	24/02/2010	14+420	4	166	162	160
27	25/02/2010	14+580	5	176	172	170
28	26/02/2010	14+250	3	170	168	165
29	27/02/2010	14+070	2	166	160	158
30	01/03/2010	14+190	1	168	164	160
31	04/03/2010	14+560	1	180	176	170
32	08/03/2010	14+720	4	180	174	172
33	09/03/2010	15+850	2	170	168	166
34	12/03/2010	15+500	2	168	166	164
35	20/03/2010	14+950	4	168	164	160
36	22/03/2010	15+600	2	178	174	172
37	23/03/2010	14+760	3	162	158	156
38	25/03/2010	14+820	2	176	174	170

➤ *Temperaturas de mezclado y tendido.*

Con las temperaturas de mezclado y compactación se requiere llevar un control muy estricto, pues mientras una mezcla elaborada a una temperatura menor a la recomendada tiene problemas de cubrimiento del pétreo con el asfalto, aquella mezcla elaborada a temperaturas mayores a las recomendadas presenta un envejecimiento acelerado en el asfalto.

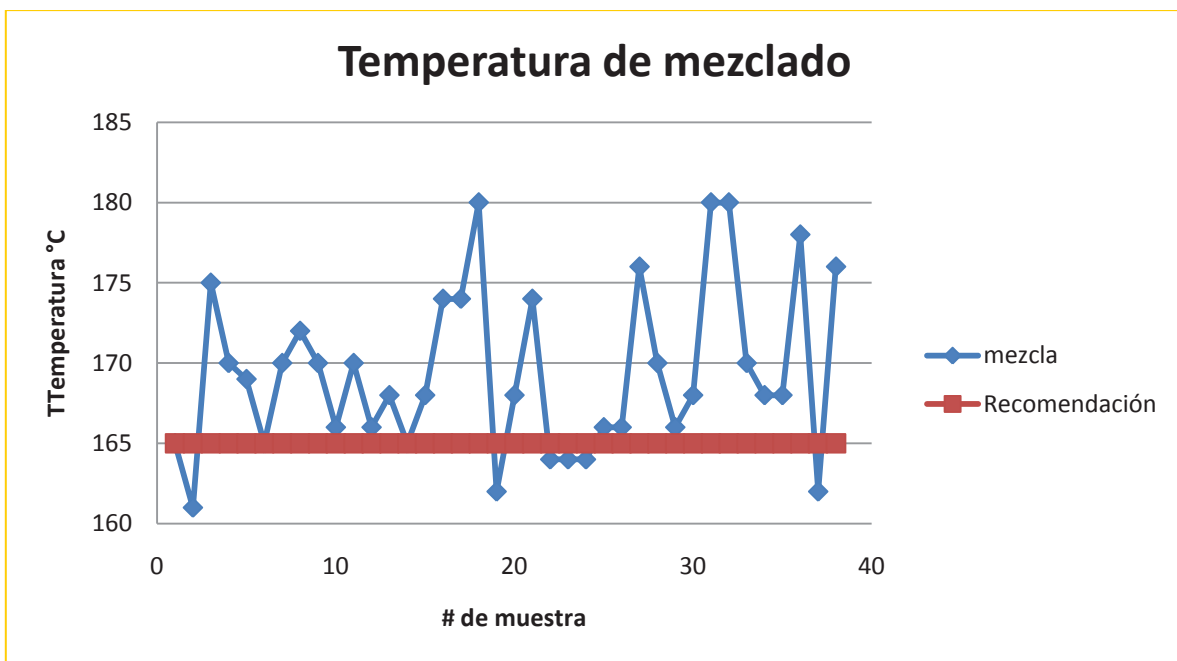


Fig. 6.39: Temperatura de mezclado.

En lo que respecta a las temperaturas de compactación; temperaturas bajas a las recomendadas ocasionan que el asfalto no tenga la fluidez necesaria para permitir el acomodo de las partículas del pétreo en la mezcla, mientras que compactación a temperaturas altas imposibilitan el paso de los compactadores ya que el asfalto es muy fluido. Una señal práctica para conocer la temperatura óptima de compactación es aquella en la que el rodillo liso puede pasar sin desplazar la mezcla asfáltica.

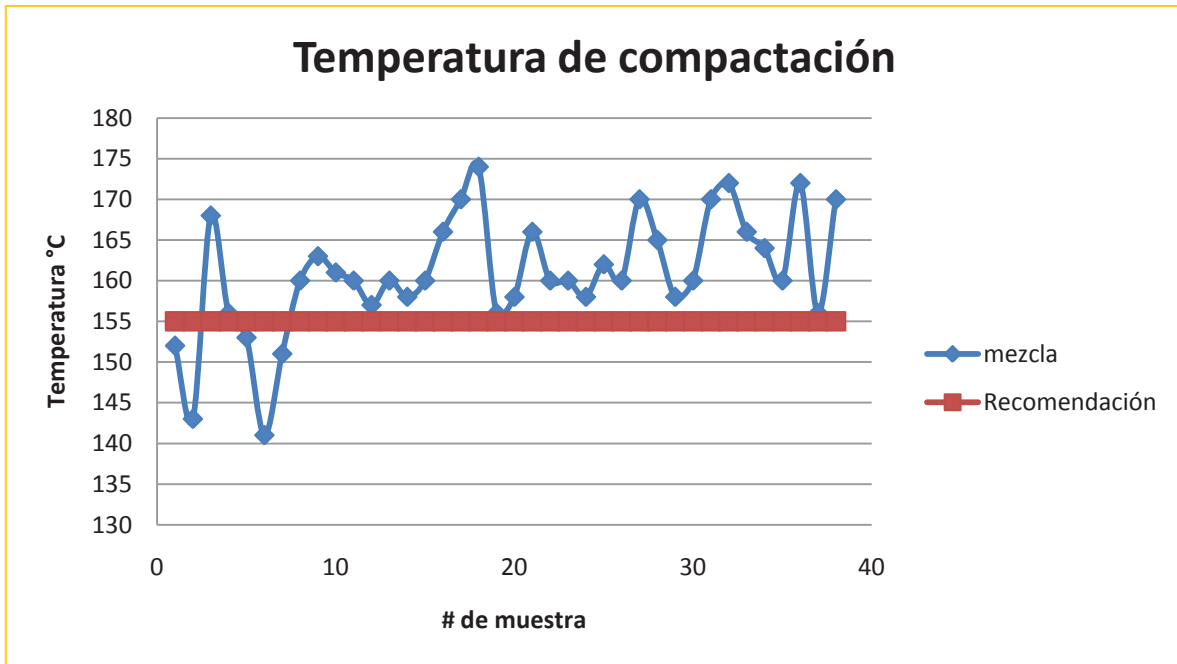


Fig. 6.40: Temperatura de compactación.

Para el tramo en cuestión observamos en la **grafica** que la mezcla se elaboro a temperaturas mayores a las recomendadas y por lo tanto se favoreció al envejecimiento del asfalto generando que este se rigidice en un menor tiempo al normal y por lo tanto hay más posibilidad de que se presente la falla por fatiga.

➤ *% De vacíos de aire.*

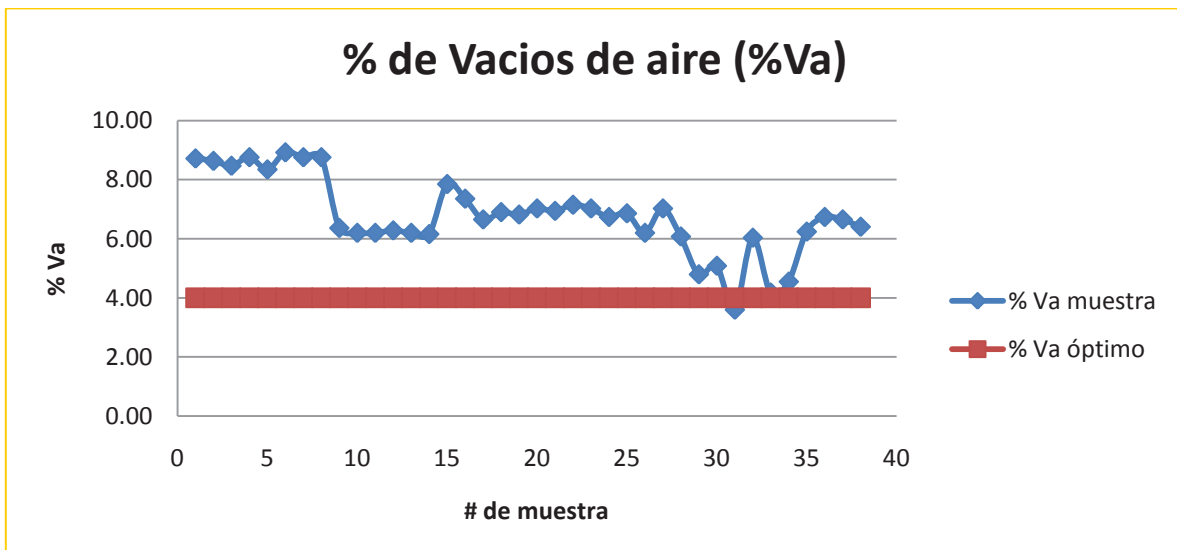


Fig. 6.41: Comparación entre % de vacíos de la mezcla elaborada y el % de vacíos de proyecto.

Se observa claramente que la mezcla elaborada en planta tiene un alto porcentaje de vacíos de aire por lo que se puede presentar interconexión entre los vacíos y provocar que exista flujo de agua intersticial provocando que la mezcla sea más susceptible a la humedad que la mezcla de diseño, además de promover el envejecimiento.

➤ *Contenido de asfalto*

En la **figura 3.2** se muestra clara la tendencia del constructor a realizar la mezcla con un contenido de asfalto igual o superior al de proyecto con la finalidad de hacer las cosas *mejor* que en el proyecto. Sin embargo, por ser un tramo de prueba se debe colocar justo el porcentaje indicado en el diseño de la mezcla 4.5%, porque en caso contrario, el comportamiento de la mezcla no será el considerado en el diseño.

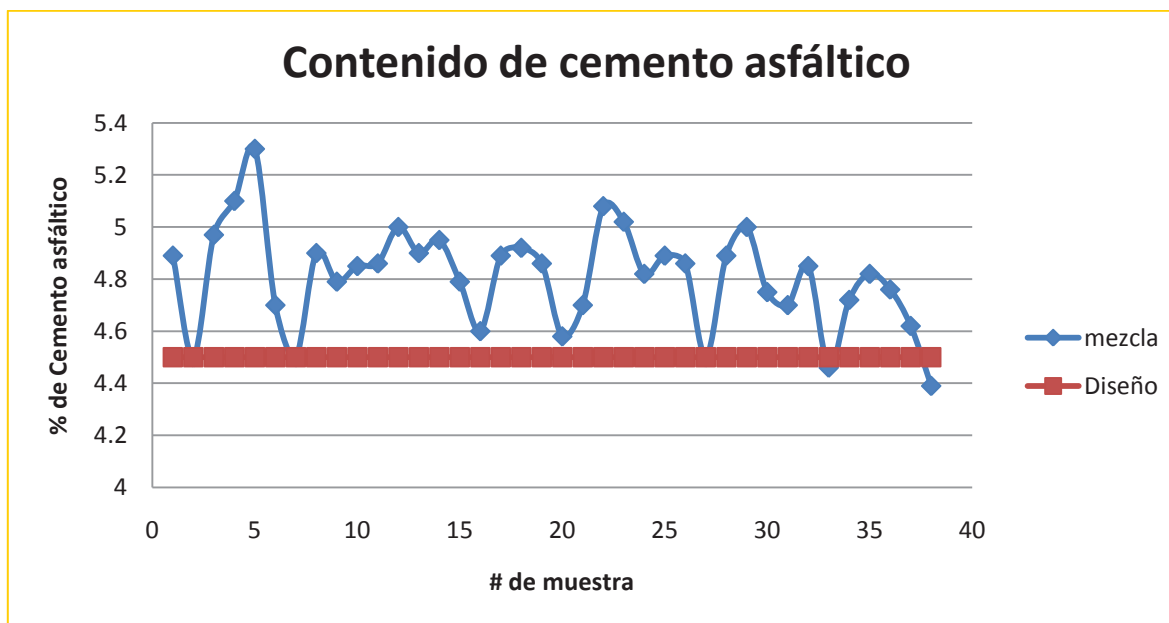


Fig. 6.42: Contenido de asfalto de la mezcla en planta comparada con el contenido de proyecto.

Es importante llevar el control del contenido de asfalto que se le agrega a la mezcla ya que un porcentaje de asfalto mayor al óptimo puede generar en la mezcla asfáltica en operación problemas de roderas al existir una película muy gruesa cubriendo al pétreo y no permitiendo que la resistencia se encuentre en el

esqueleto mineral. Un porcentaje de asfalto por debajo del óptimo de diseño no cubre por completo al agregado pétreo y ocasiona que se tenga una alta susceptibilidad a la humedad y se presente desgranamiento de los materiales que componen la mezcla asfáltica.

➤ *Calidad del asfalto.*

La **tabla** indica la calidad de una muestra de cemento asfáltico obtenida el día 22 de diciembre de 2009 directamente del carro tanque de AMMEX.

Tabla 6.9Calidad del cemento asfáltico empleado en el tramo de prueba.

	Ensaye	Especificación	
Del cemento asfáltico modificado:			
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C; s.	290	1000	Máximo
Viscosidad rotacional Brookfield a 135°C; Pa.s.	1.89	4	Máximo
Penetración a 25°C, 100g, 5 s; 10 ⁻¹ mm.	52	40	Mínimo
Penetración a 4°C, 200g, 60 s; 10 ⁻¹ mm.	29	25	Mínimo
Punto de inflamación Cleveland; °C.	265	230	Mínimo
Punto de reblandecimiento; °C.	78	55	Mínimo
Separación, diferencia anillo y esfera; °C.	2	3	Máximo
Recuperación elástica por torsión a 25°C.	47	35	Mínimo
Resiliencia, a 25°C; %.	26	20	Mínimo
Del residuo de la prueba de la película delgada, (3,2mm, 50g).			
Perdida por calentamiento a 163°C, %.	0.85	1	Máximo
Penetración retenida a 4 °C, 200g, 60s; %.	68	65	Mínimo
Recuperación elástica en ductilometro a 25 °C; %.	50	60	Mínimo
Módulo Reológico de corte dinámico a 76°C (G*/sen δ); kPa.	3.86	2.2	Mínimo
Ángulo de fase (δ) [Visco elasticidad], a 76°C: (Grados).	63.7	75	Máximo

Se puede observar que el asfalto cumple con la calidad exigida, excepto en lo referente a recuperación elástica en ductilometro, sin embargo por ser poca la diferencia en comparación con la especificación y por ser esta prueba poco representativa de la caracterización del asfalto se puede concluir que el asfalto es apto para su aplicación.

➤ *Granulometrías*

La línea negra indica la granulometría de diseño, mientras que la línea roja indica la granulometría obtenida durante el control de calidad.

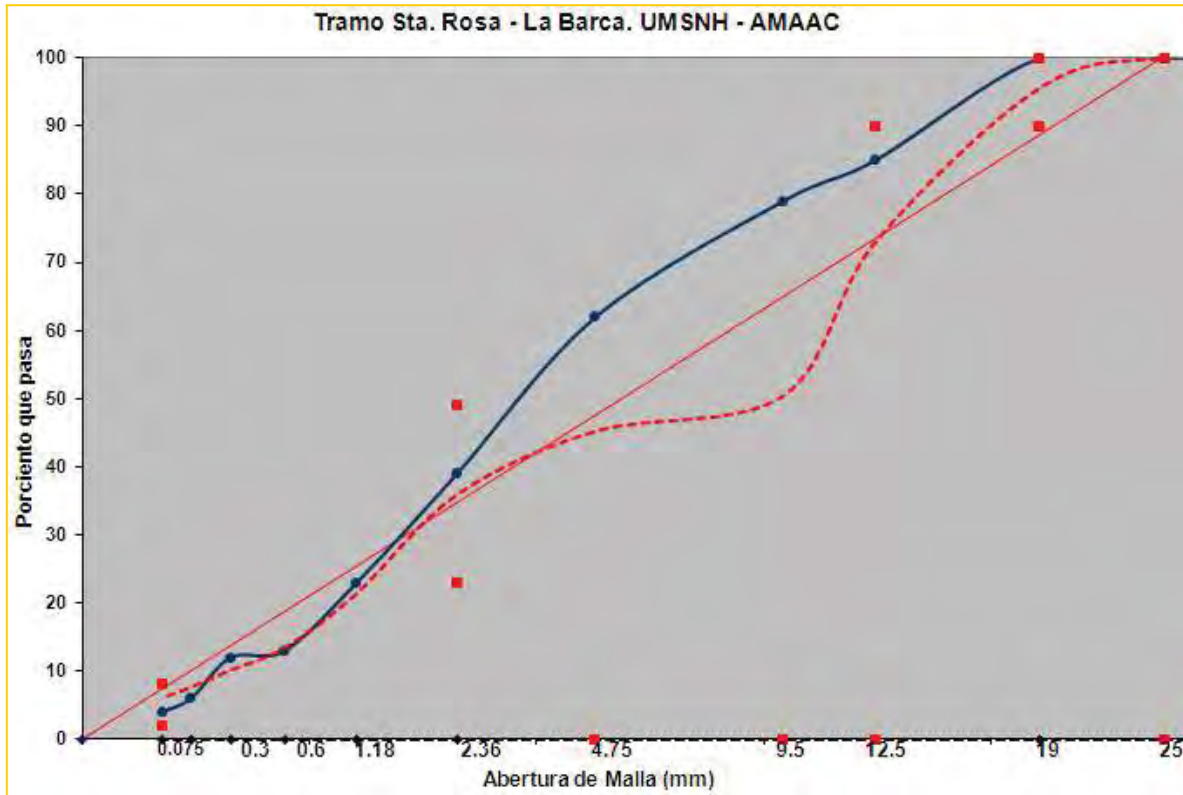


Fig. 4.12.

Fig. 6.43: Mezcla elaborada el día 13 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+700 franja 3.

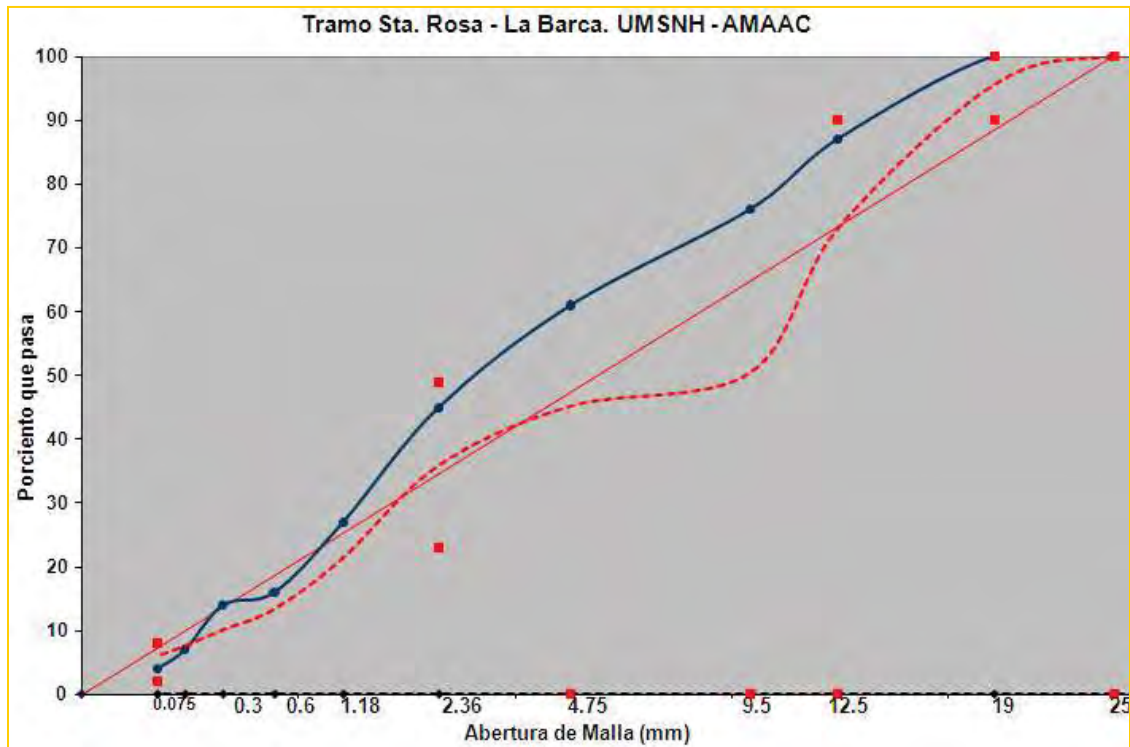


Fig. 6.44: Mezcla elaborada el día 13 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+650 franja 4.

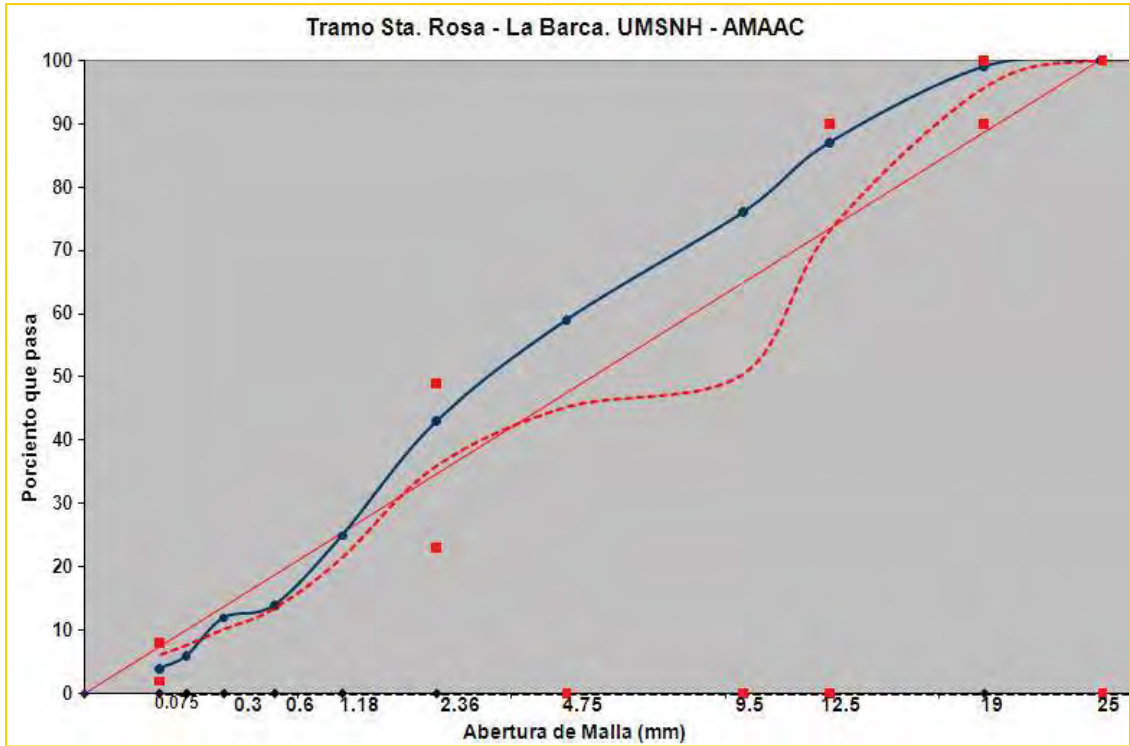


Fig. 6.45: Mezcla elaborada el día 14 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+900 franja 4.

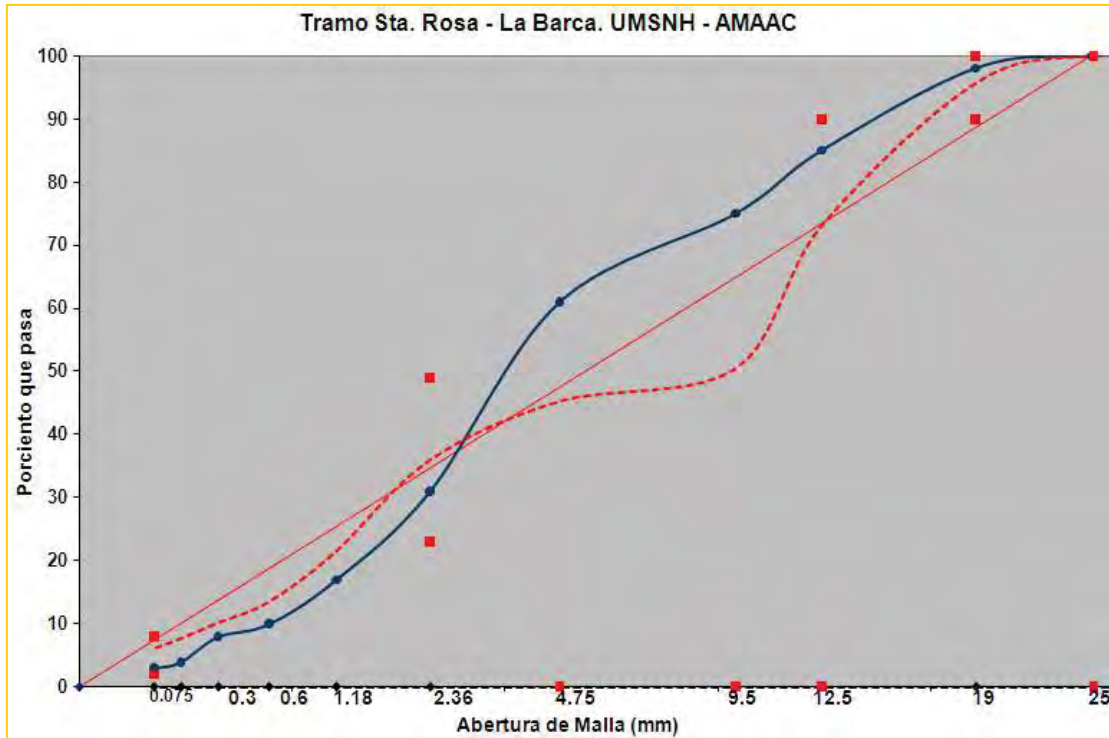


Fig. 6.46: Mezcla elaborada el día 18 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+350 franja 6.

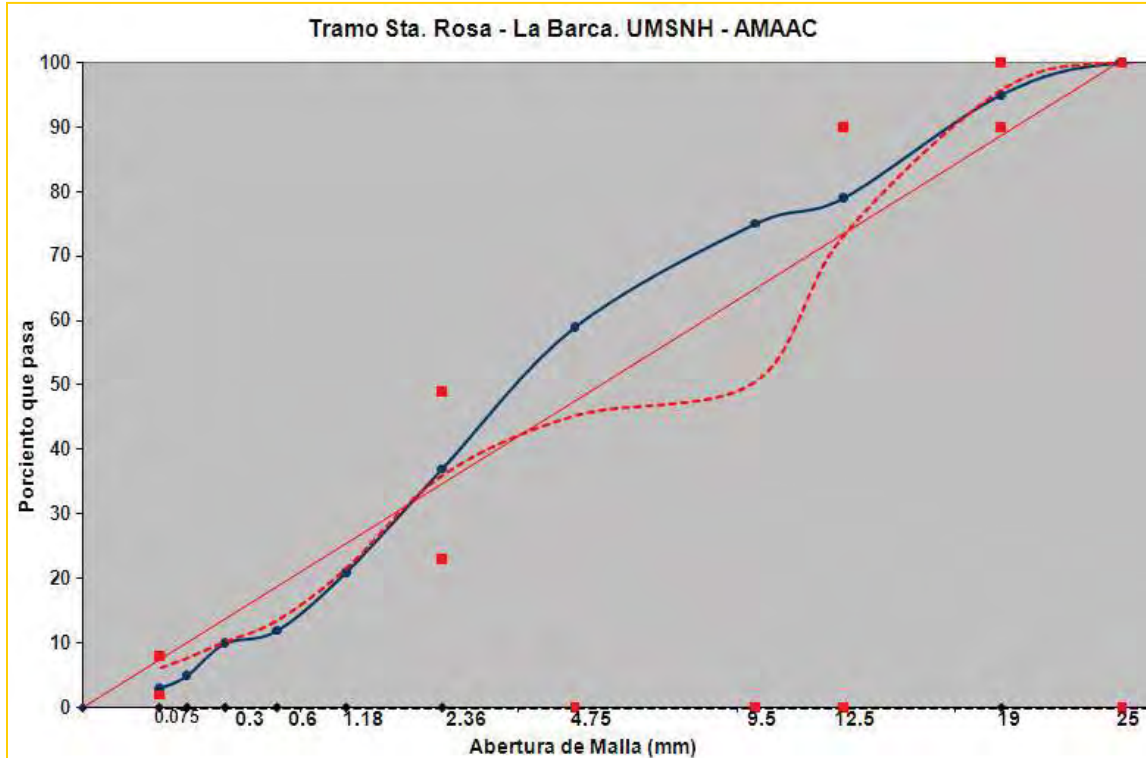


Fig. 6.47: Mezcla elaborada el día 18 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+900 franja 6.

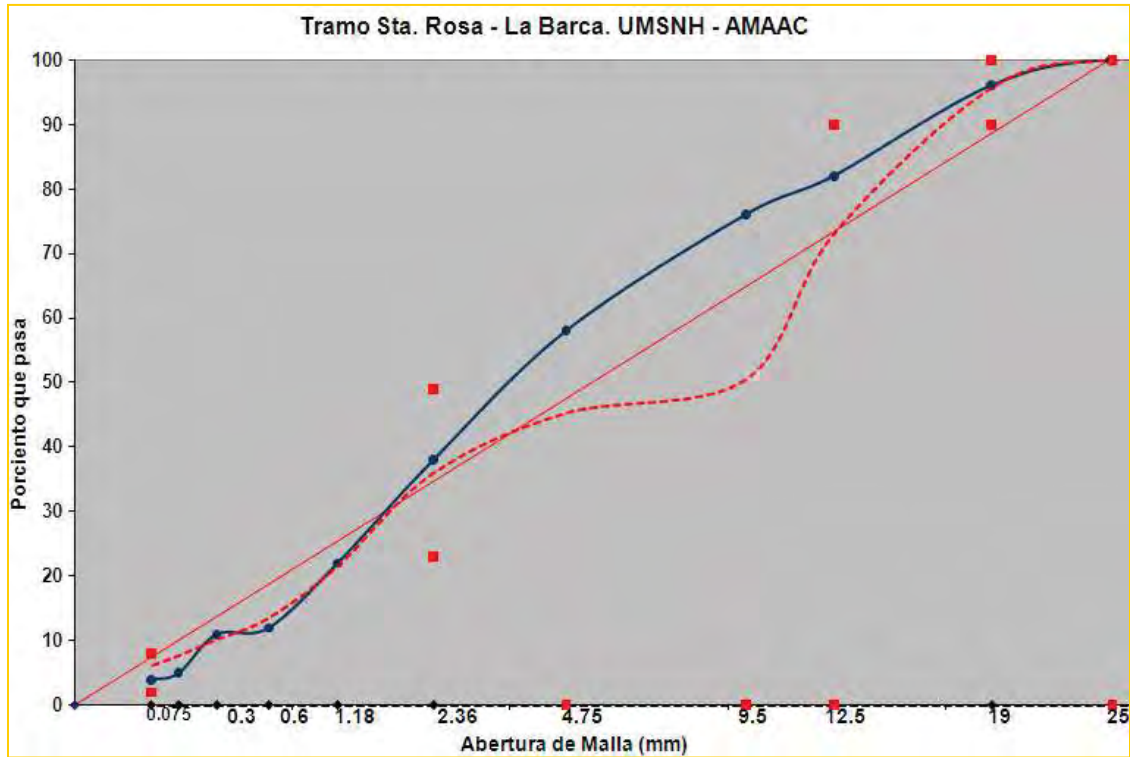


Fig. 6.48: Mezcla elaborada el día 19 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+950 franja 2.

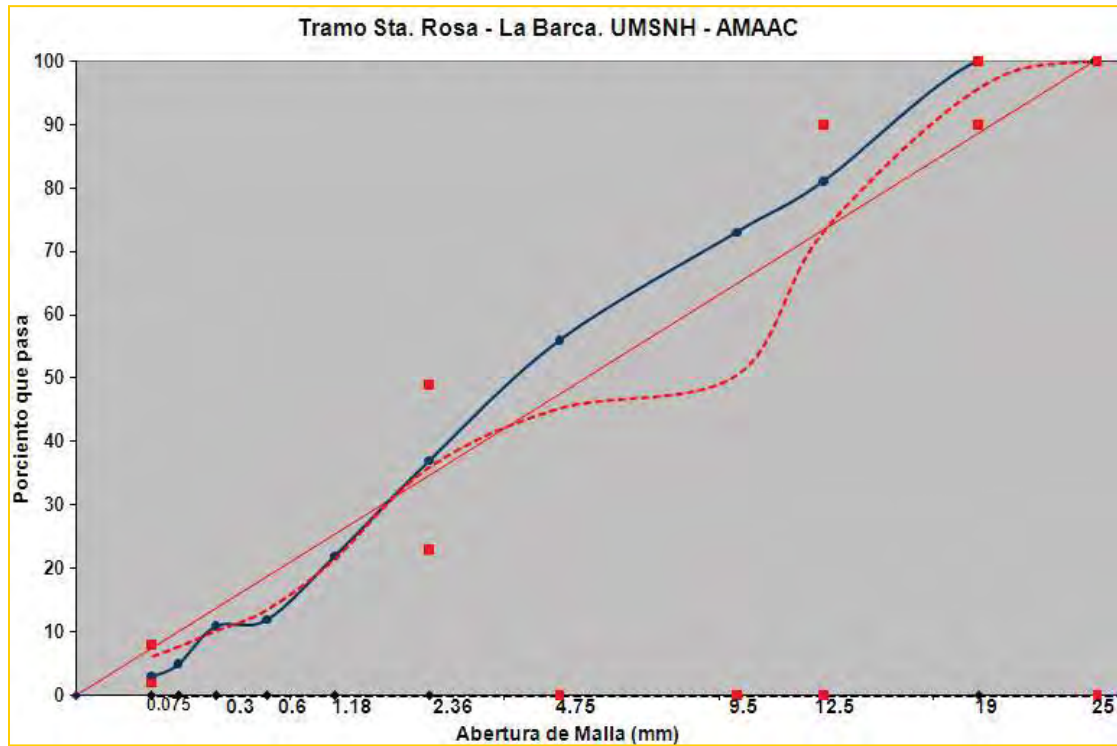


Fig. 6.49: Mezcla elaborada el día 19 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+050 franja 2.

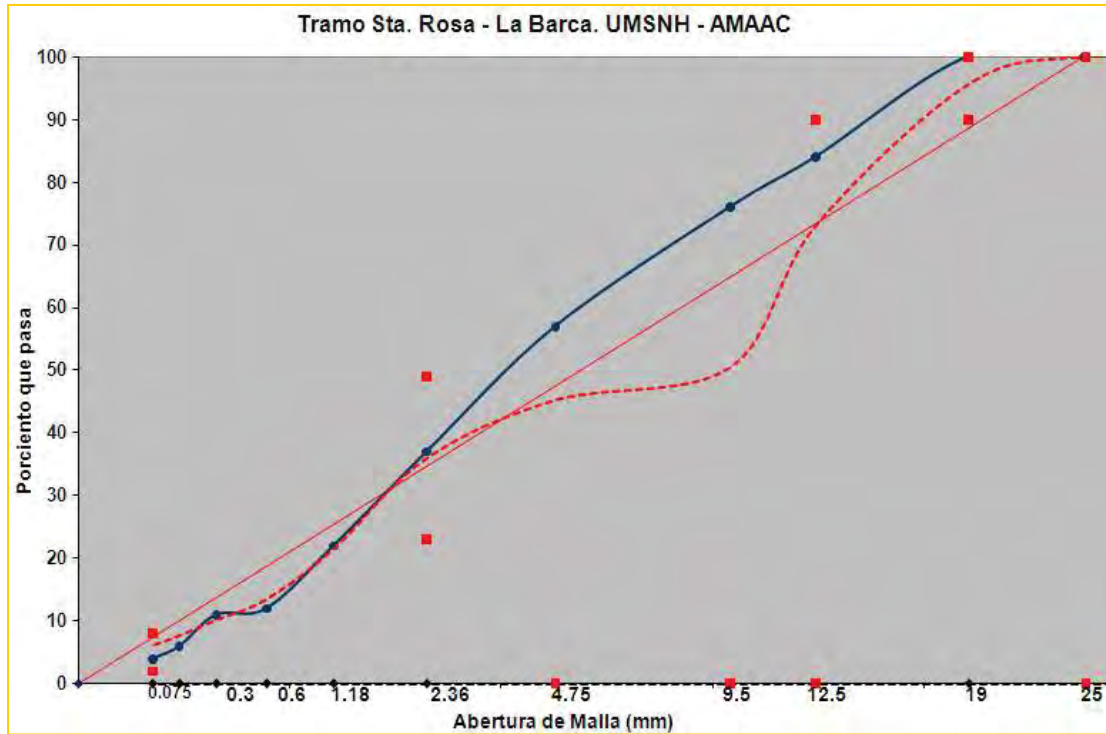


Fig. 6.50: Mezcla elaborada el día 20 de noviembre de 2009 y tendida en el km 13+550 franja 1.

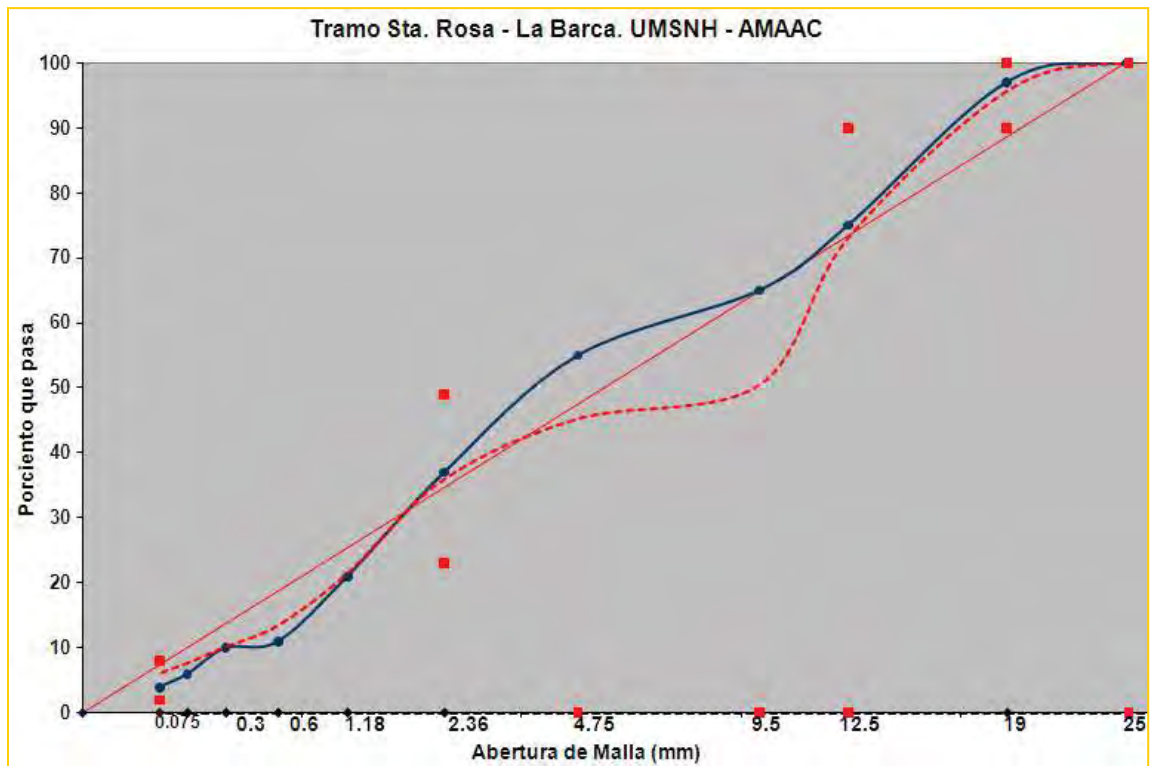


Fig. 6.51: Mezcla elaborada el día 19 de diciembre de 2009 y tendida en el km 14+200 franja 4.

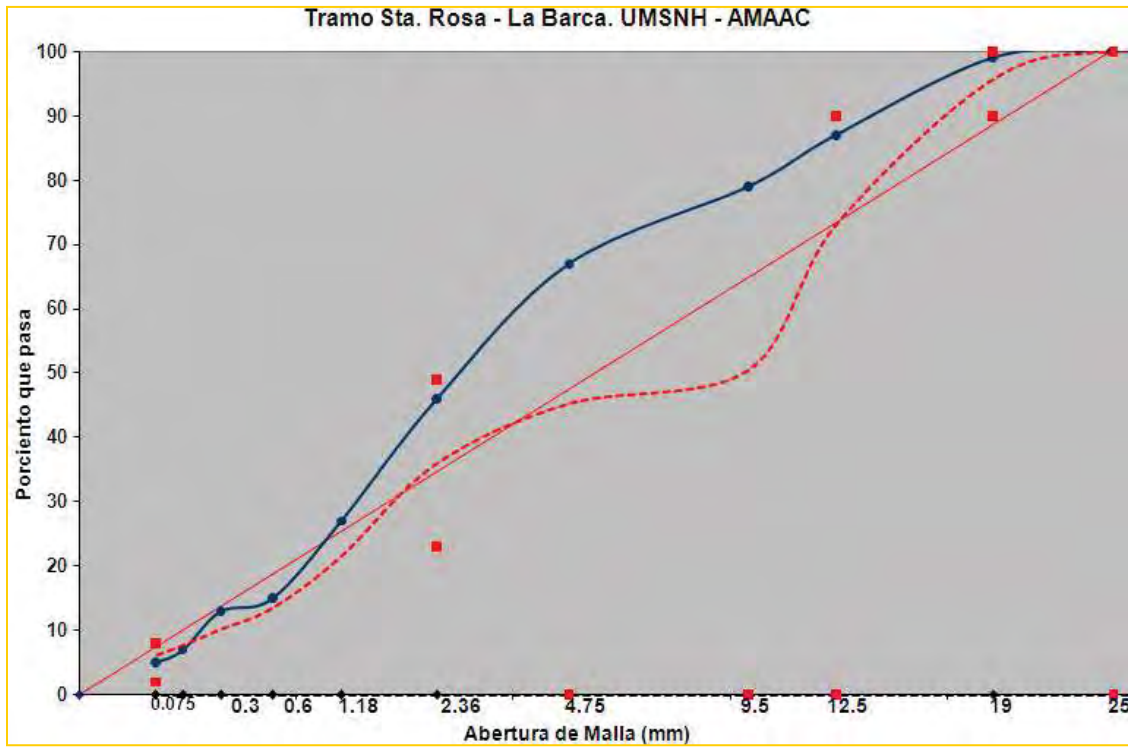


Fig. 6.52: Mezcla elaborada el día 20 de diciembre de 2009 y tendida en el km 14+180 franja 6.

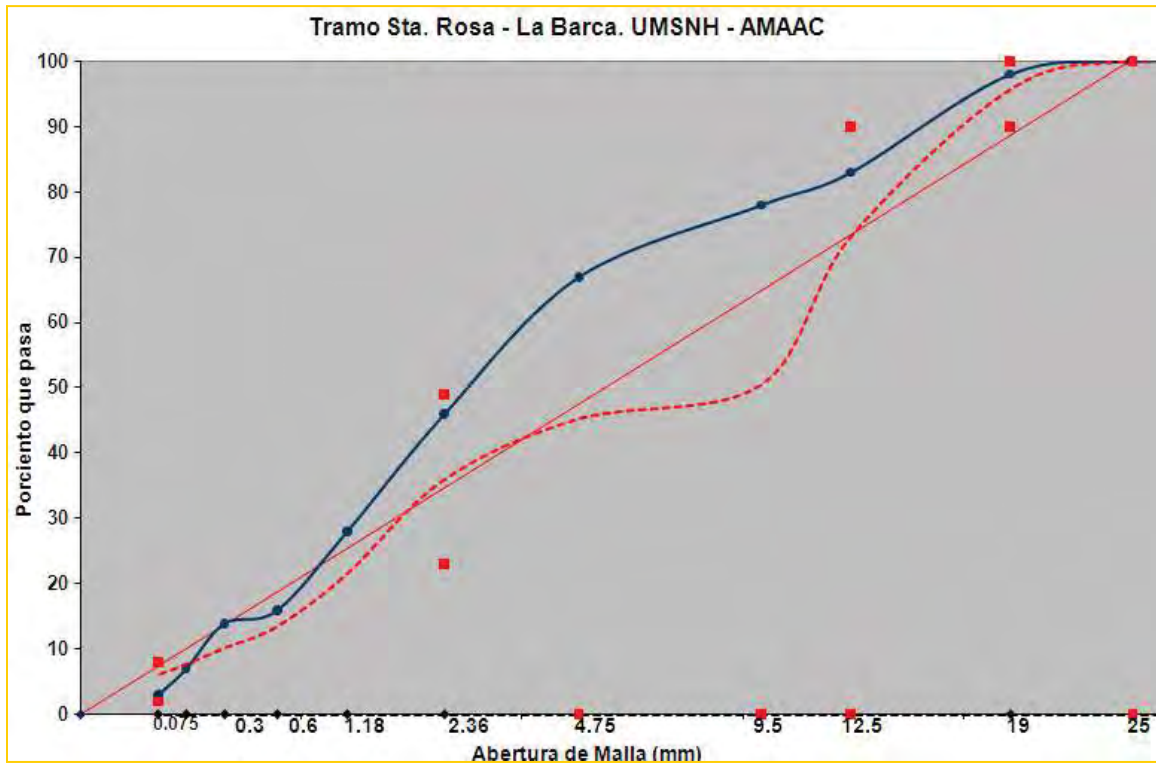


Fig. 6.53: Mezcla elaborada el día 21 de diciembre de 2009 y tendida en el km 15+250 franja 4.

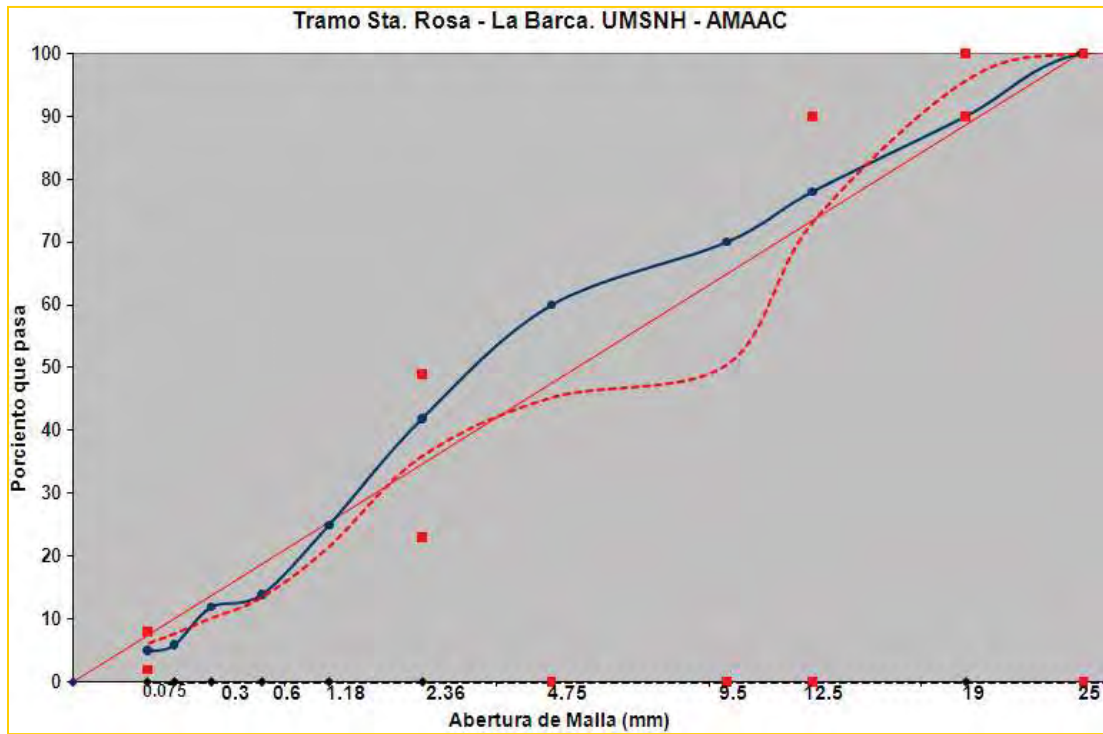


Fig. 6.54: Mezcla elaborada el día 22 de diciembre de 2009 y tendida en el km 15+020 franja 6.

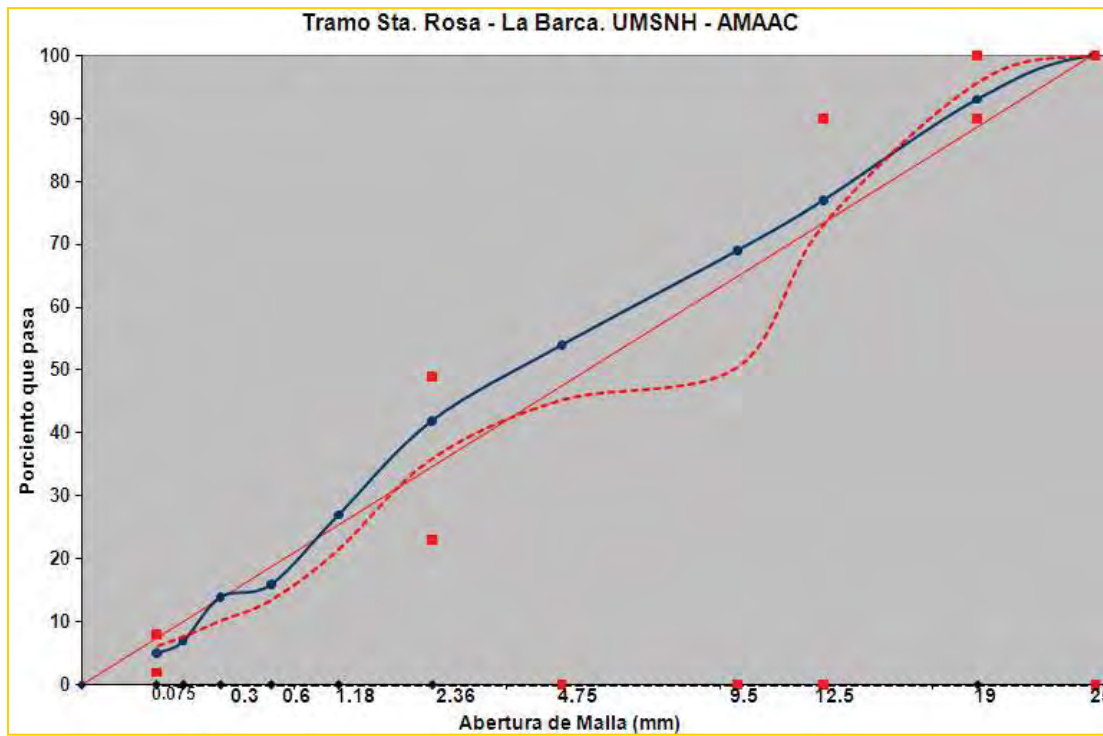


Fig. 6.55: Mezcla elaborada el día 23 de diciembre de 2009 y tendida en el km 15+280 franja 1.

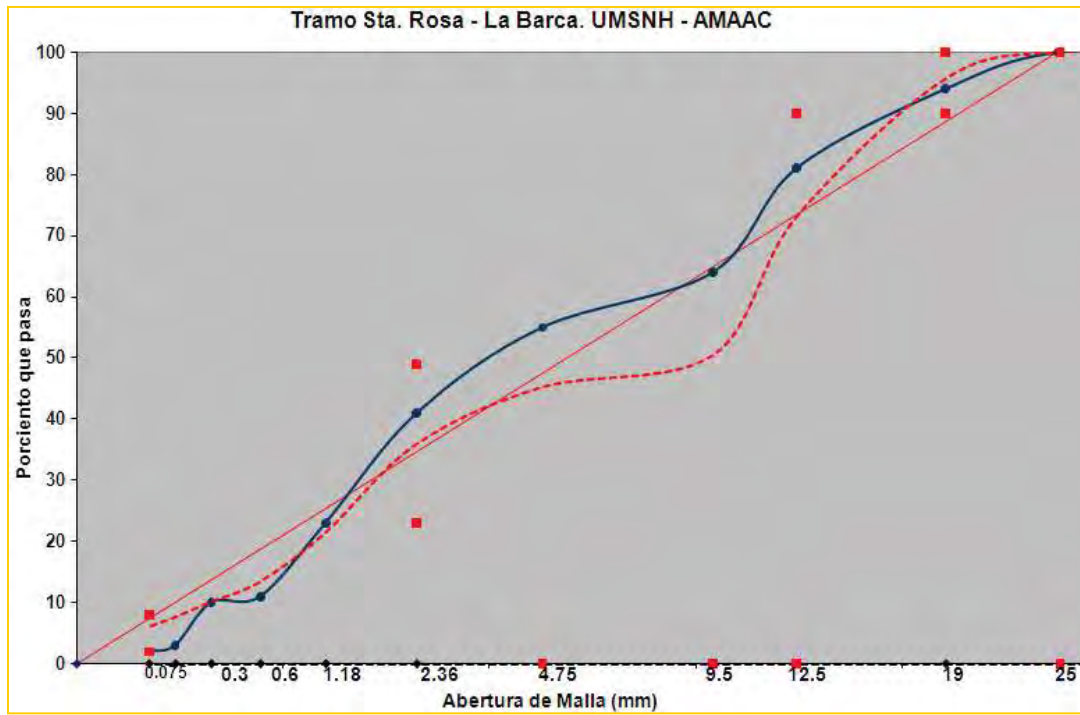


Fig. 6.56: Mezcla elaborada el día 22 de enero de 2010 y tendida en el km 16+860 franja 4.

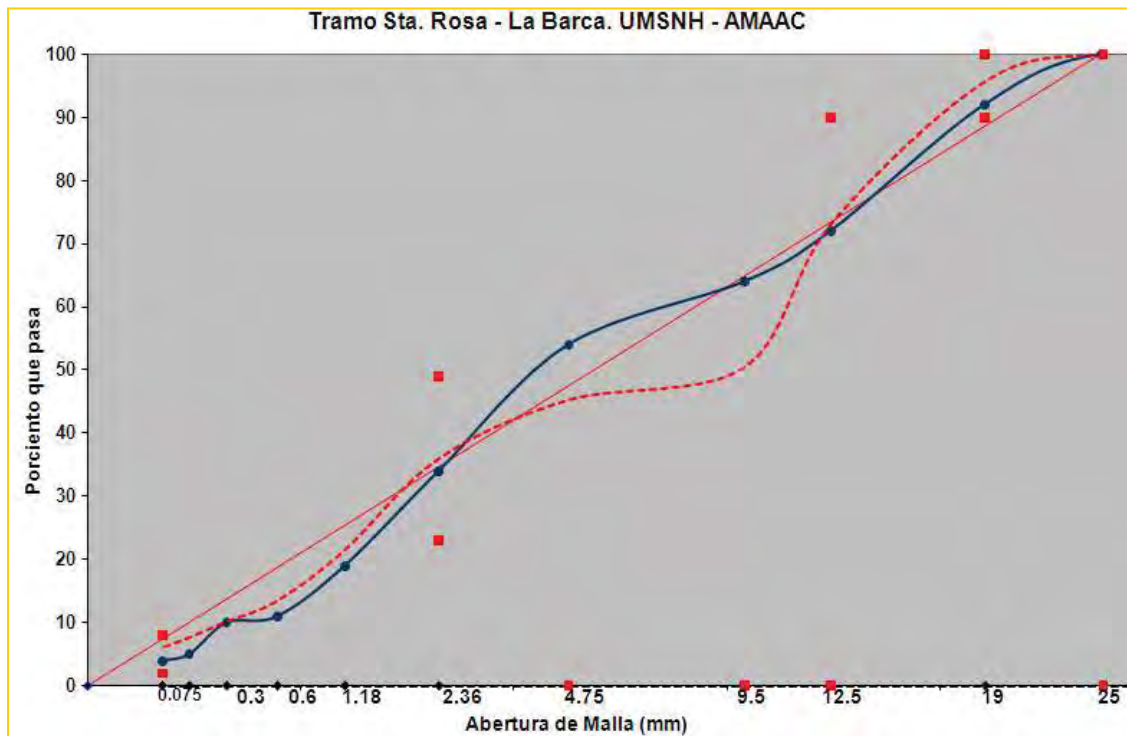


Fig. 6.57: Mezcla elaborada el día 22 de enero de 2010 y tendida en el km 16+380 franja 4.

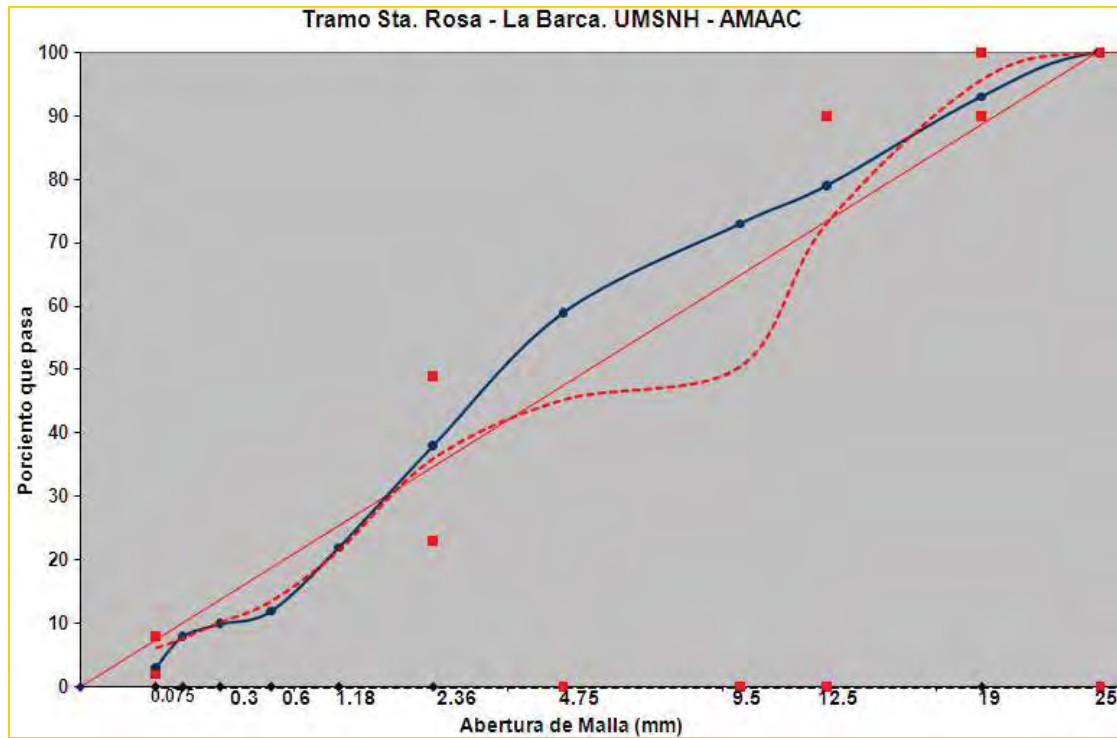


Fig. 6.58: Mezcla elaborada el día 25 de enero de 2010 y tendida en el km 16+600 franja 5.

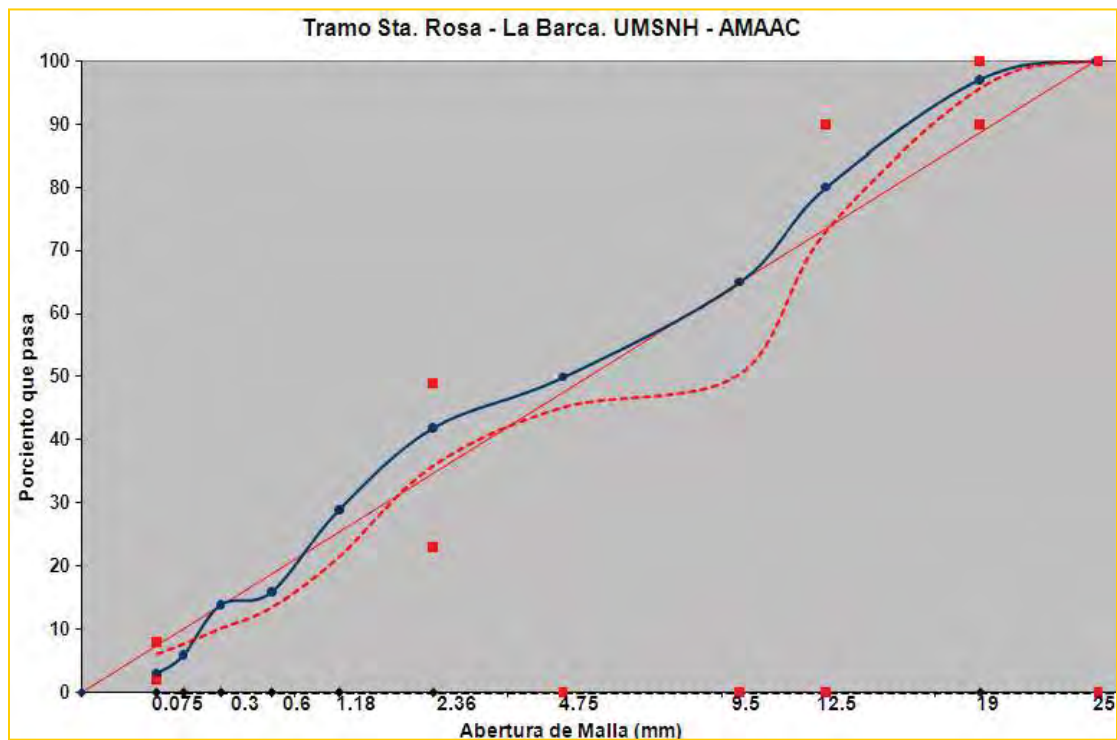


Fig. 6.59: Mezcla elaborada el día 29 de enero de 2010 y tendida en el km 16+850 franja 3.

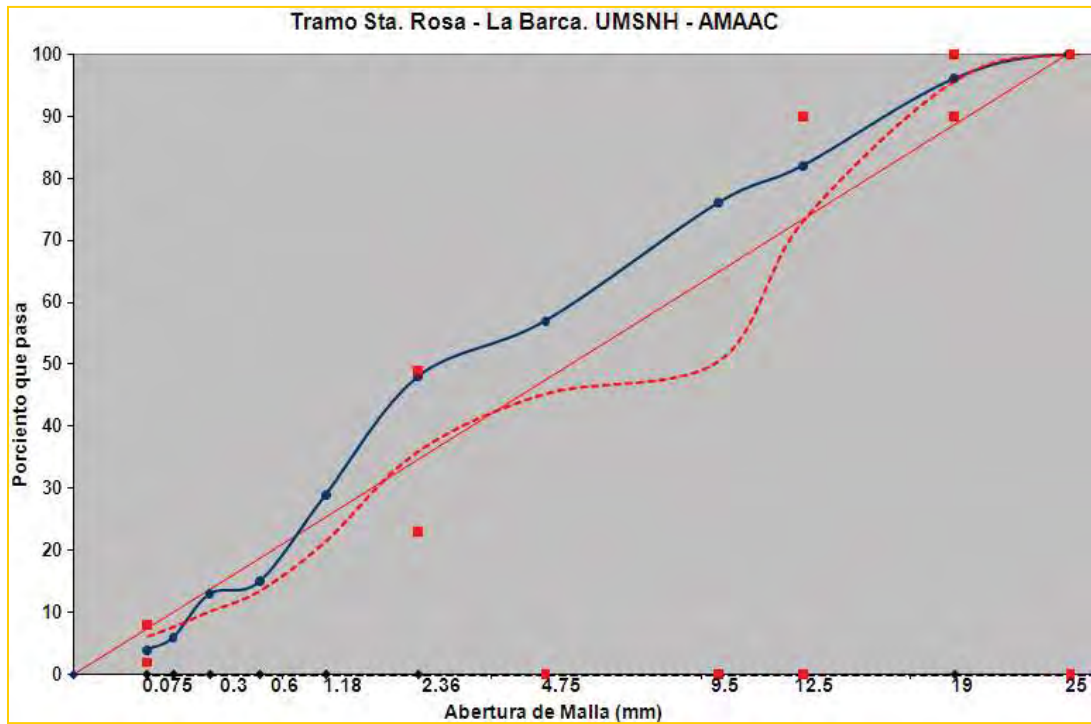


Fig. 6.60: Mezcla elaborada el día 01 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+400 franja 3.

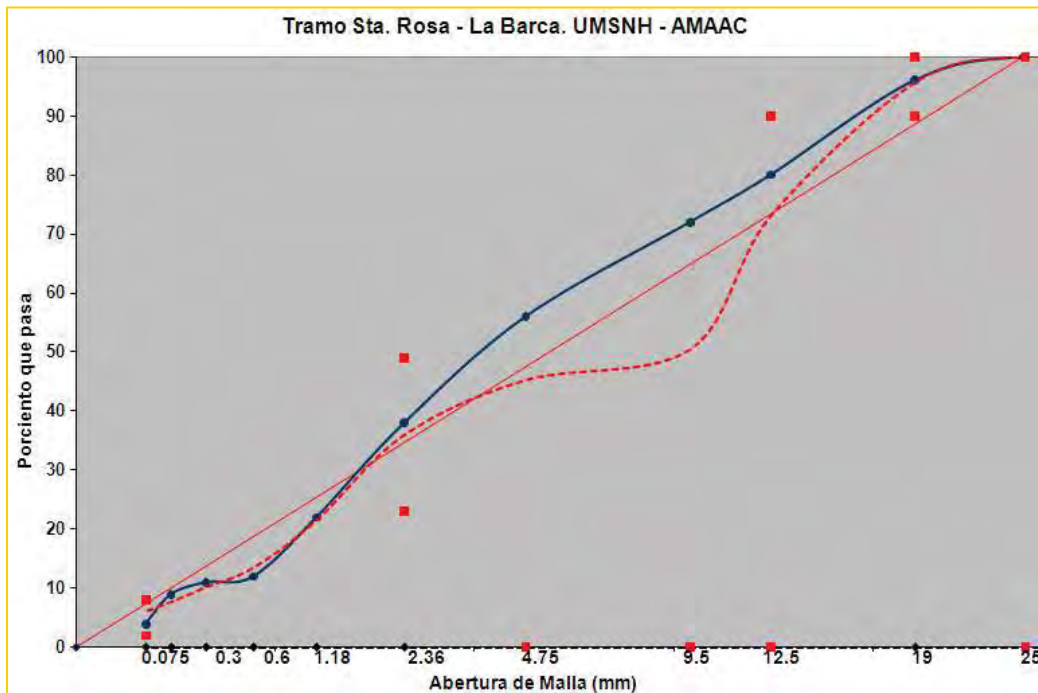


Fig. 6.61: Mezcla elaborada el día 04 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+480 franja 6

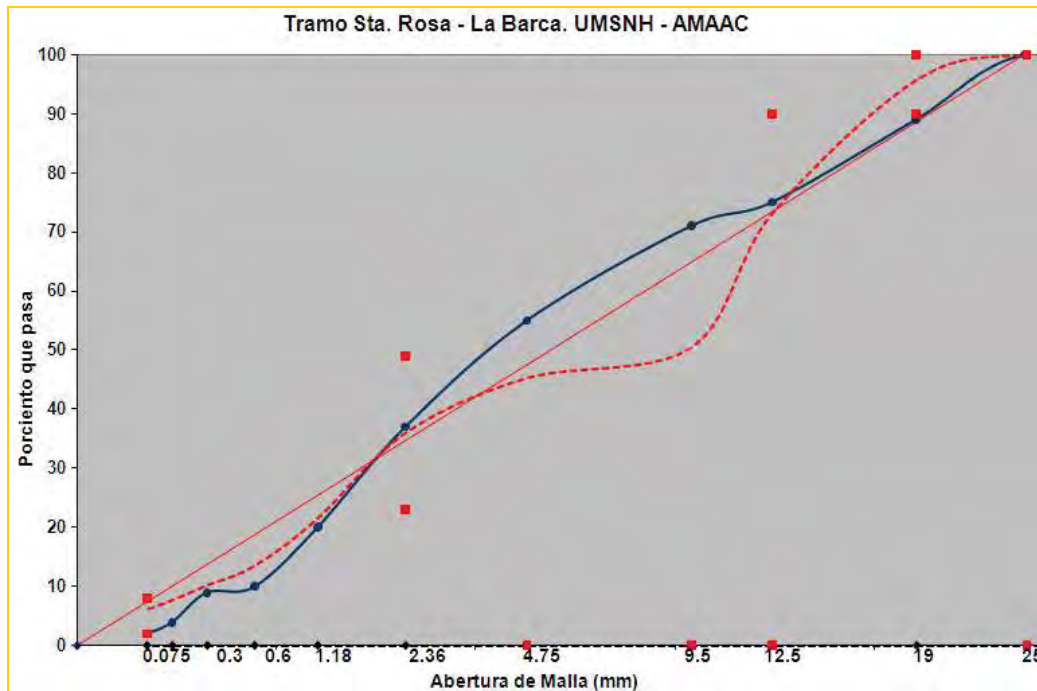


Fig. 6.62: Mezcla elaborada el día 05 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+810 franja 6.

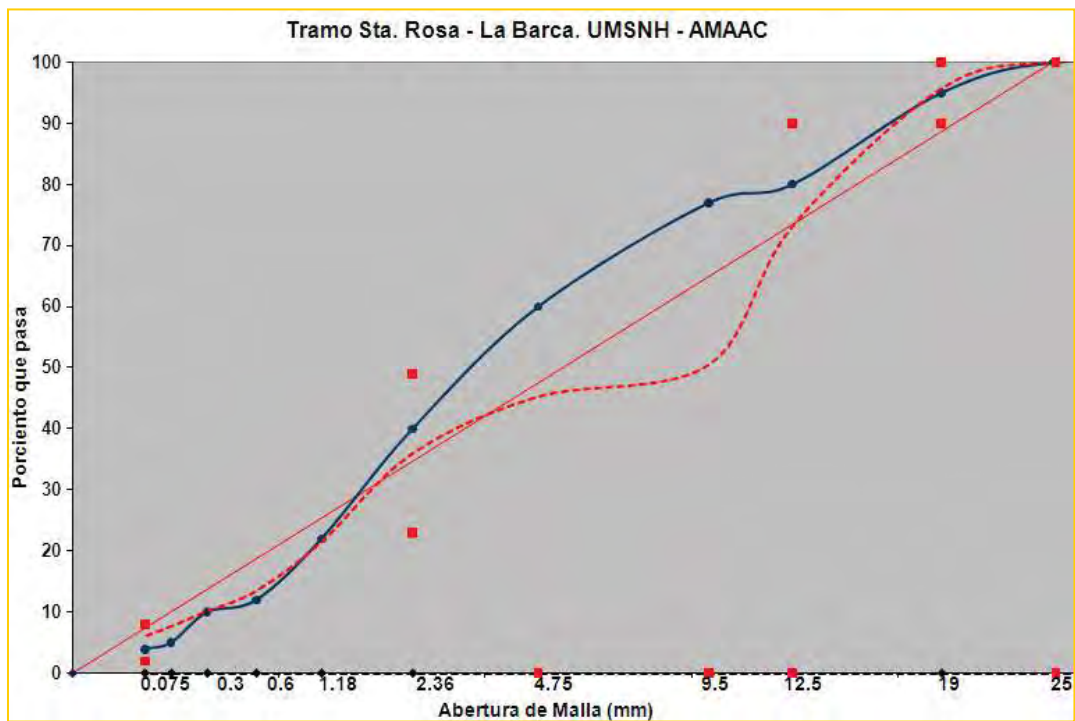


Fig. 6.63: Mezcla elaborada el día 11 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+700 franja 2.

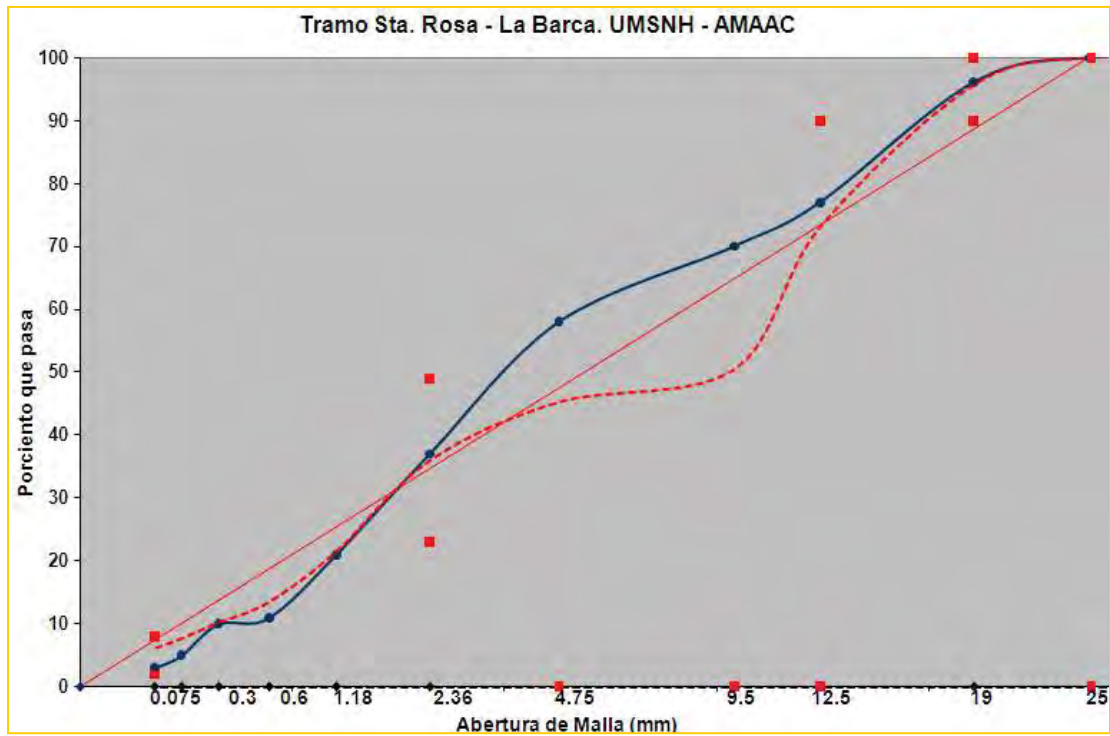


Fig. 6.64: Mezcla elaborada el día 12 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+260 franja 2.

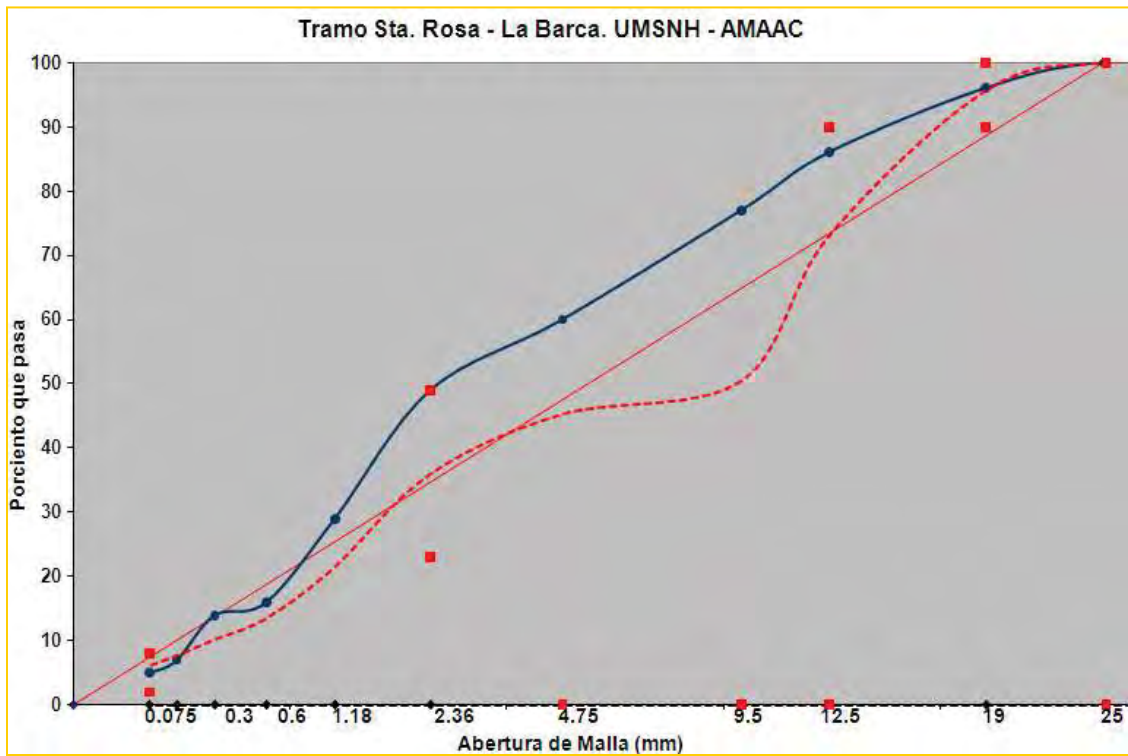


Fig. 6.65: Mezcla elaborada el día 12 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+860 franja 1.

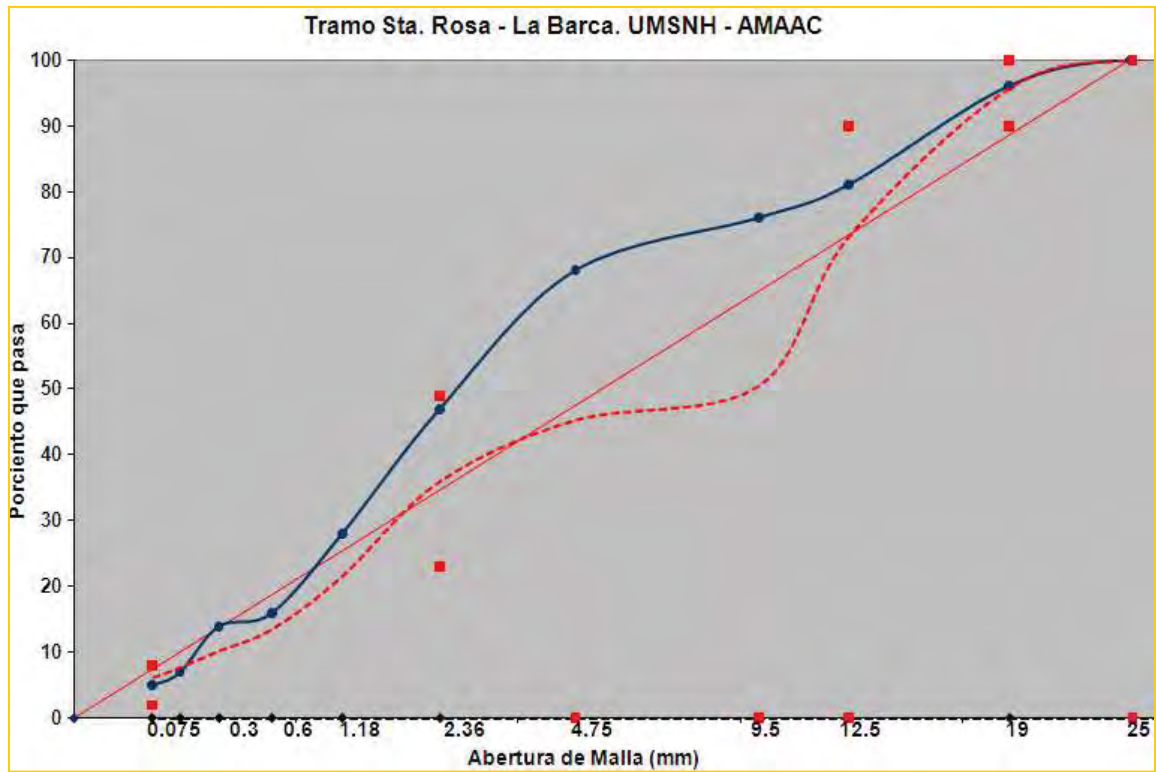


Fig. 6.66: Mezcla elaborada el día 13 de febrero de 2010 y tendida en el km 16+000 franja 3.

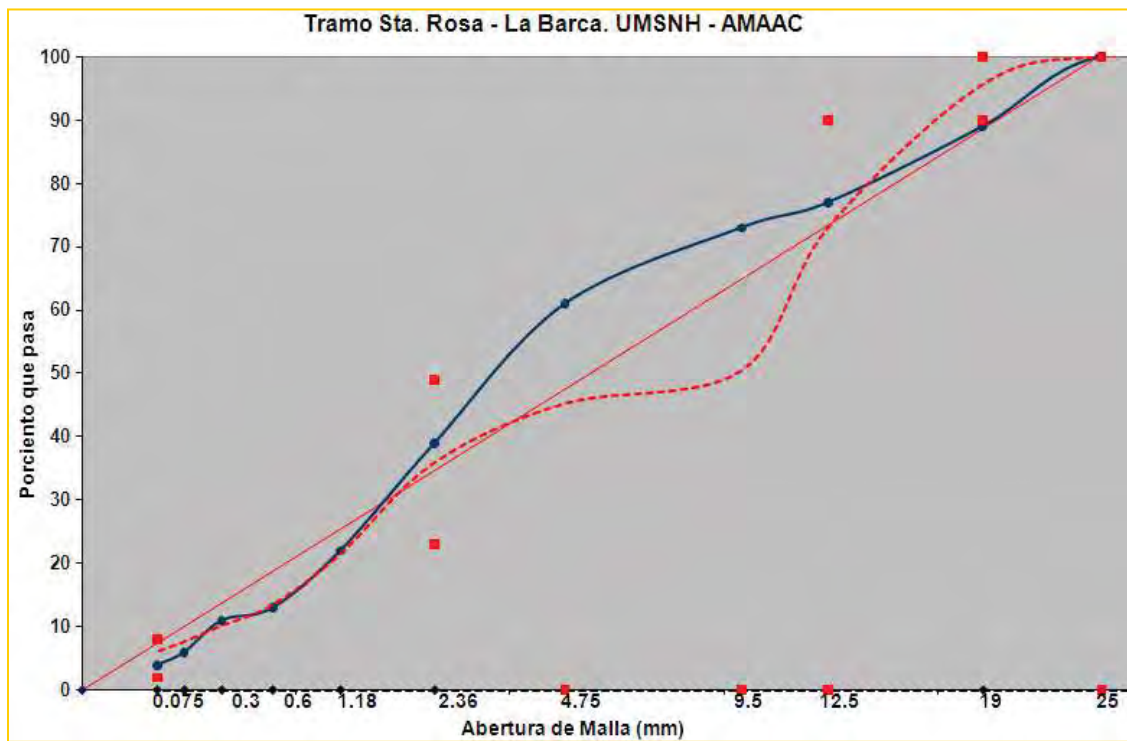


Fig. 6.67: Mezcla elaborada el día 24 de febrero de 2010 y tendida en el km 14+420 franja 4.

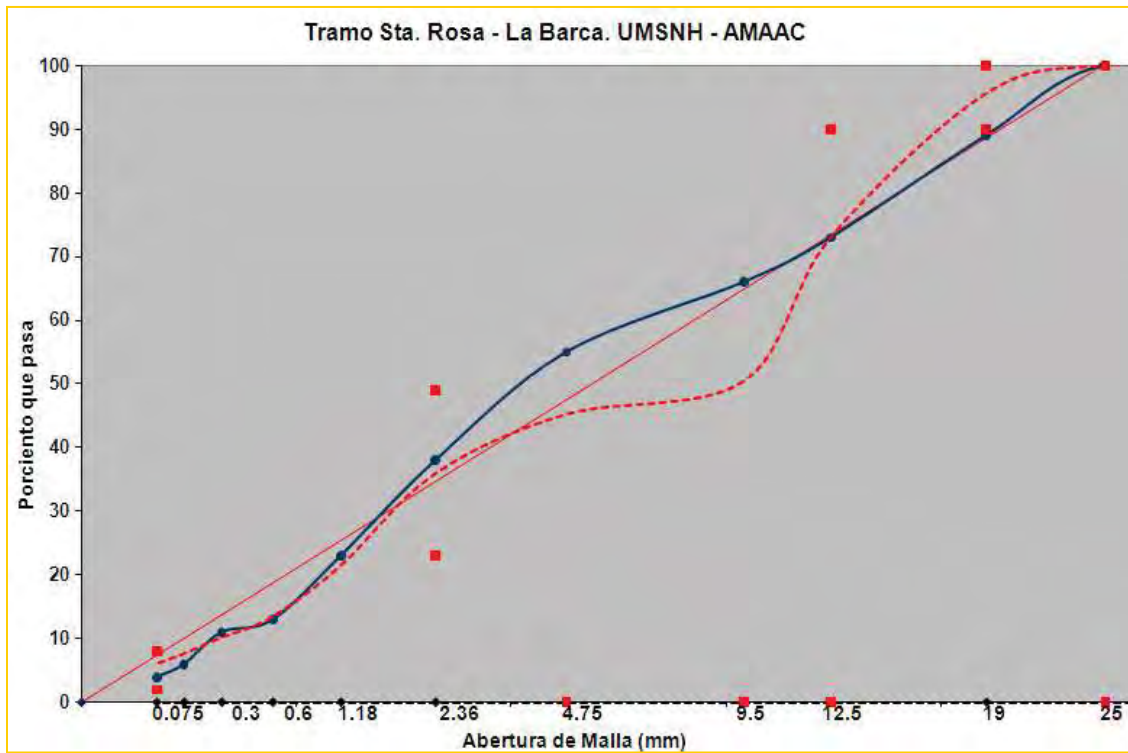


Fig. 6.68: Mezcla elaborada el día 25 de febrero de 2010 y tendida en el km 14+580 franja 5.

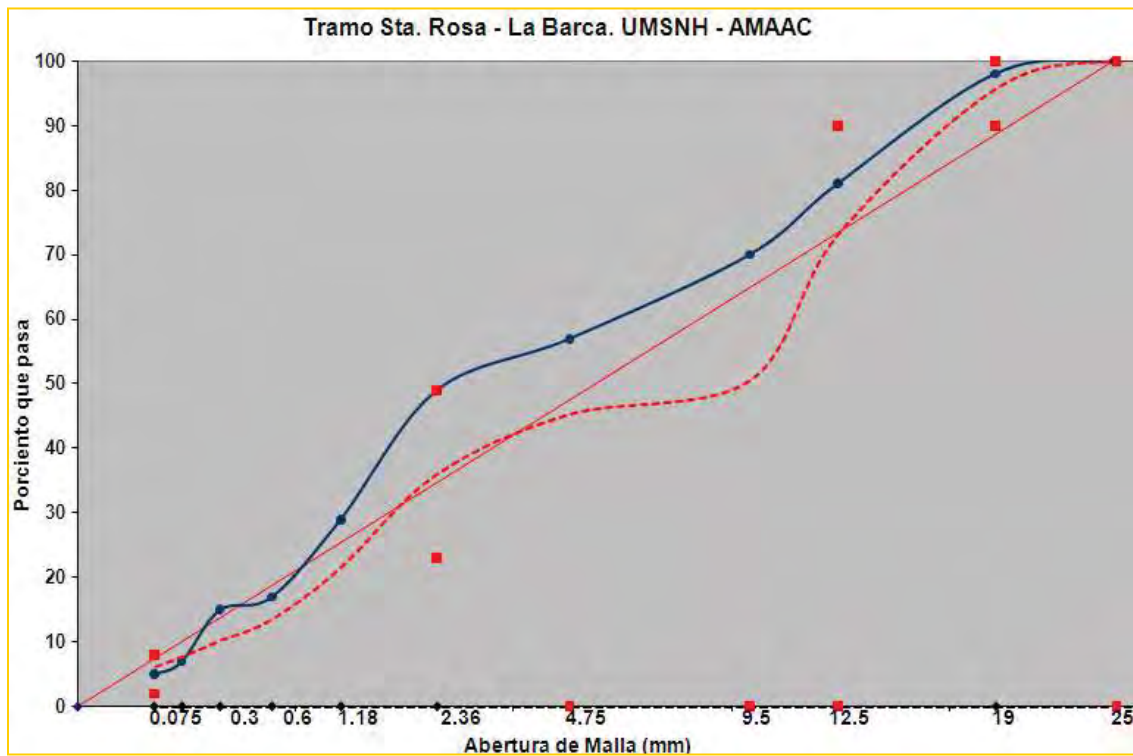


Fig. 6.69: Mezcla elaborada el día 26 de febrero de 2010 y tendida en el km 14+250 franja 3.

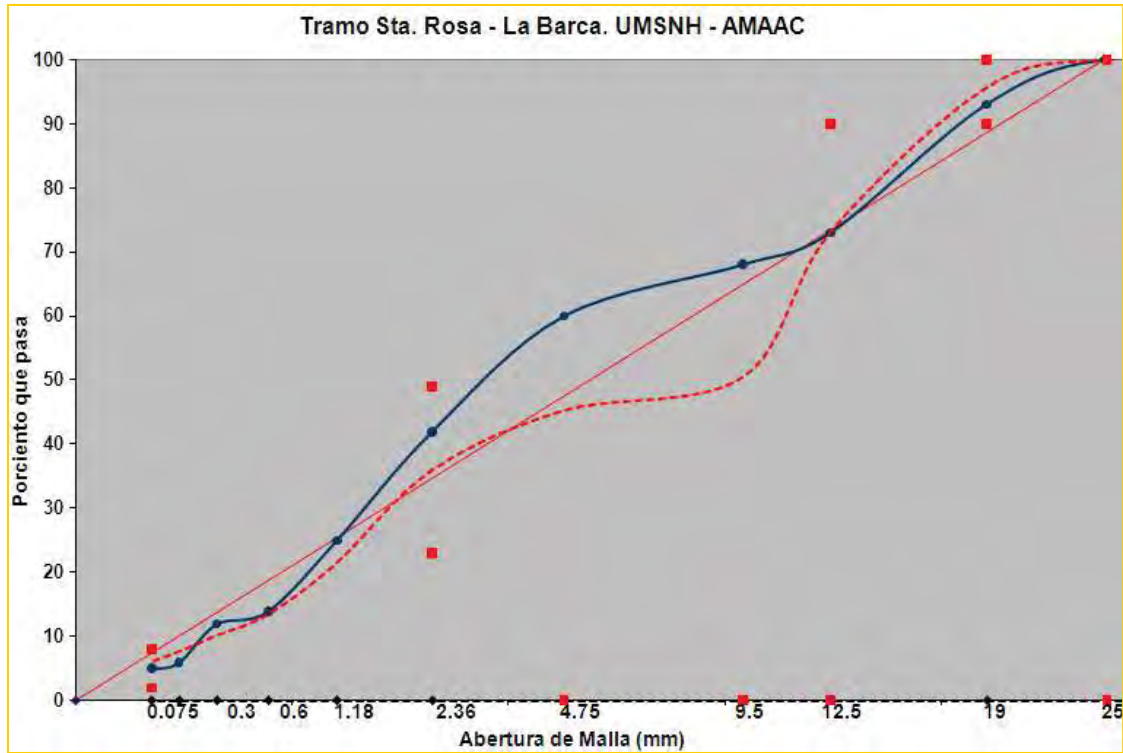


Fig. 6.70: Mezcla elaborada el día 27 de febrero de 2010 y tendida en el km 14+060 franja 2.

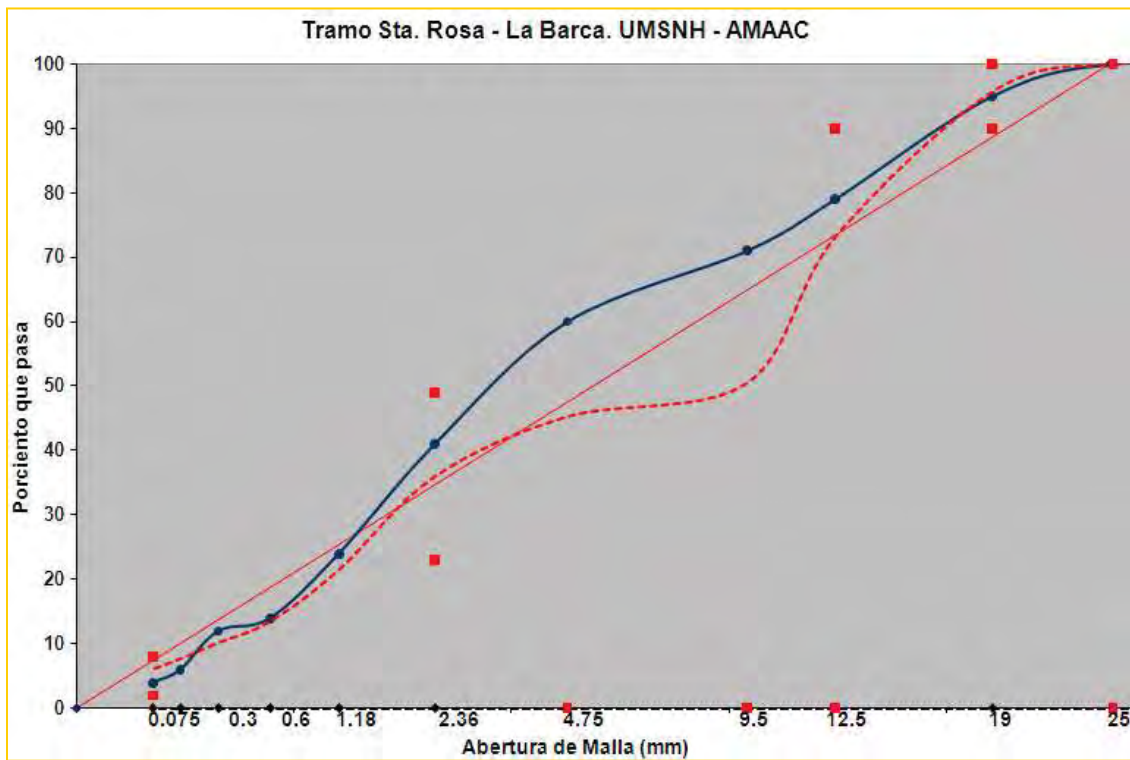


Fig. 6.71: Mezcla elaborada el día 01 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+180 franja 1.

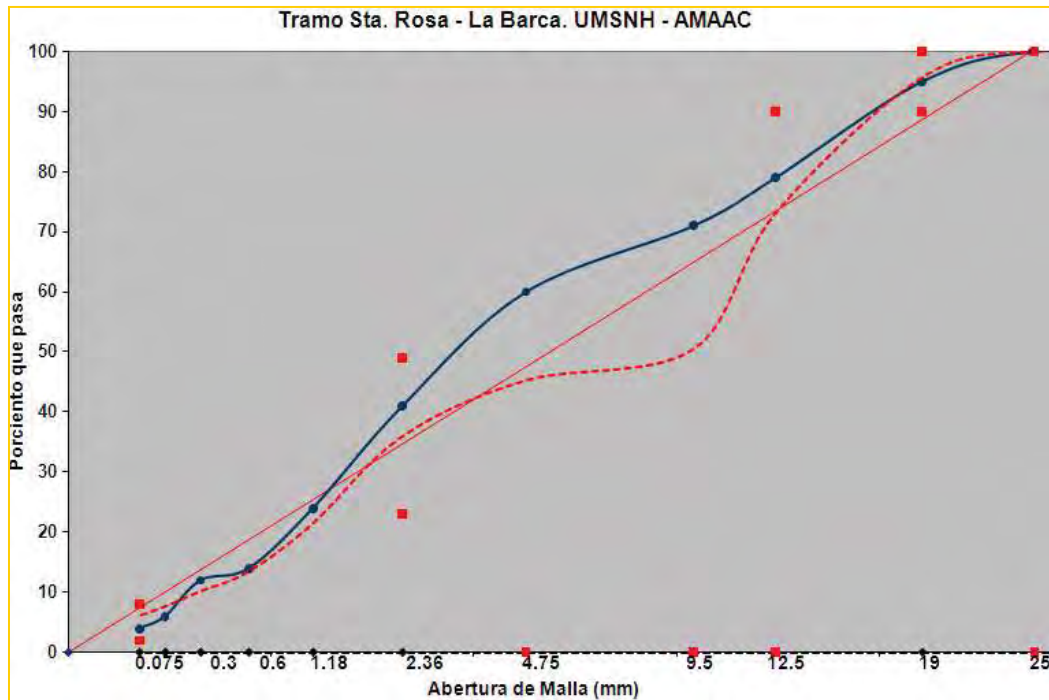


Fig. 6.72: Mezcla elaborada el día 04 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+560 franja 1.

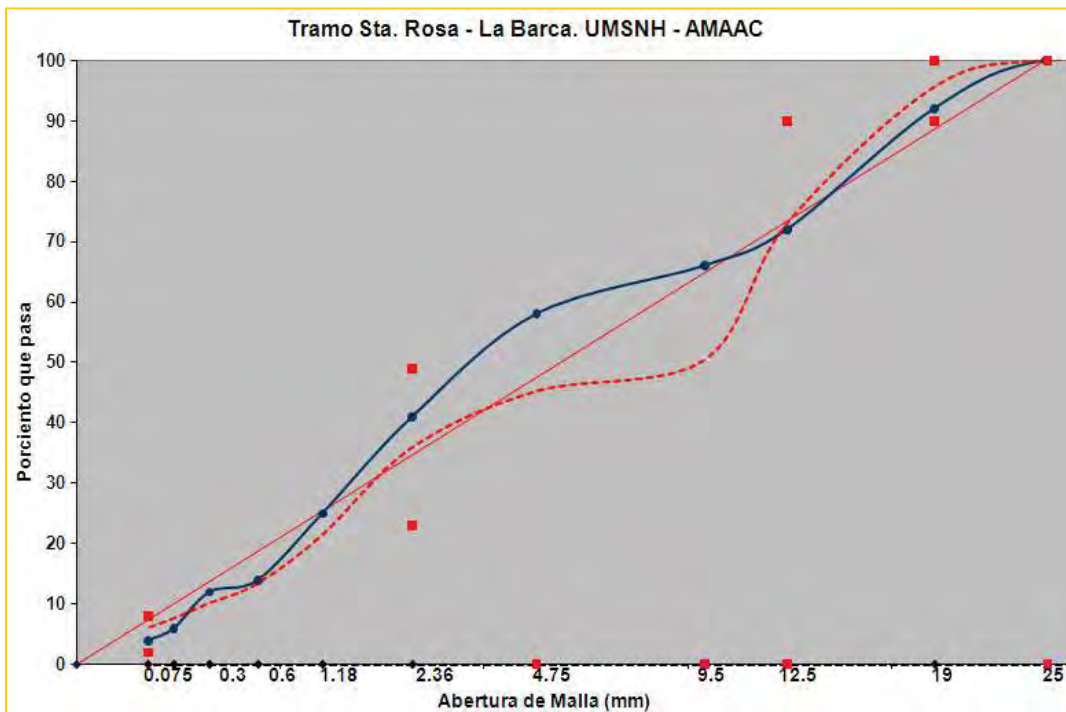


Fig. 6.73: Mezcla elaborada el día 08 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+720 franja 4.

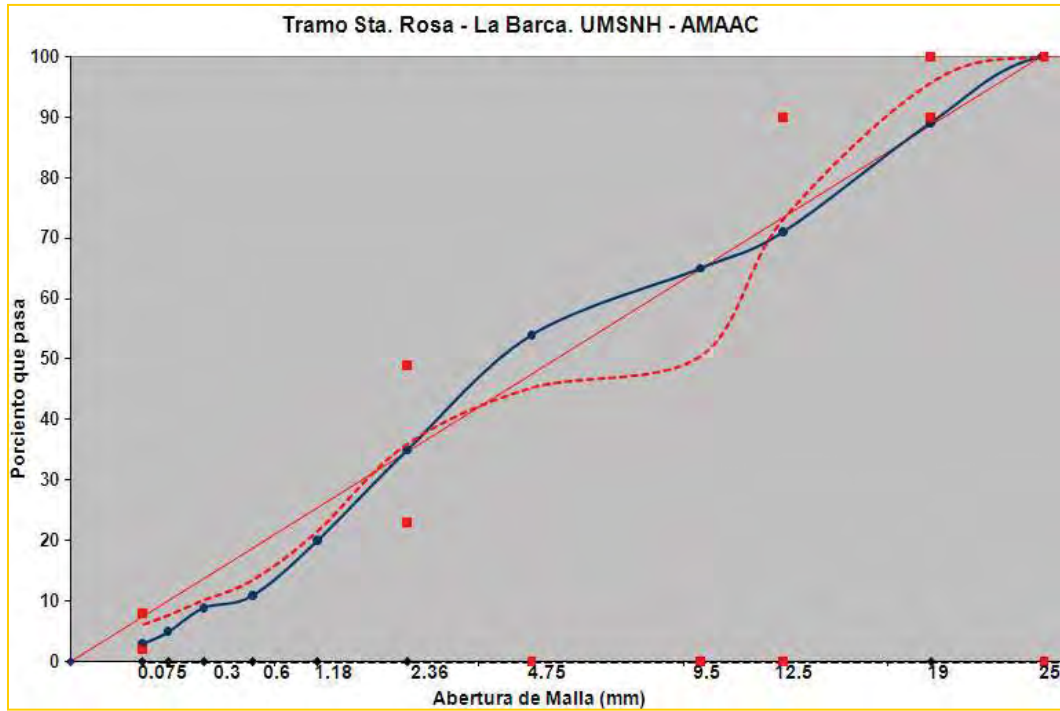


Fig. 6.74: Mezcla elaborada el día 09 de marzo de 2010 y tendida en el km 15+850 franja 2.

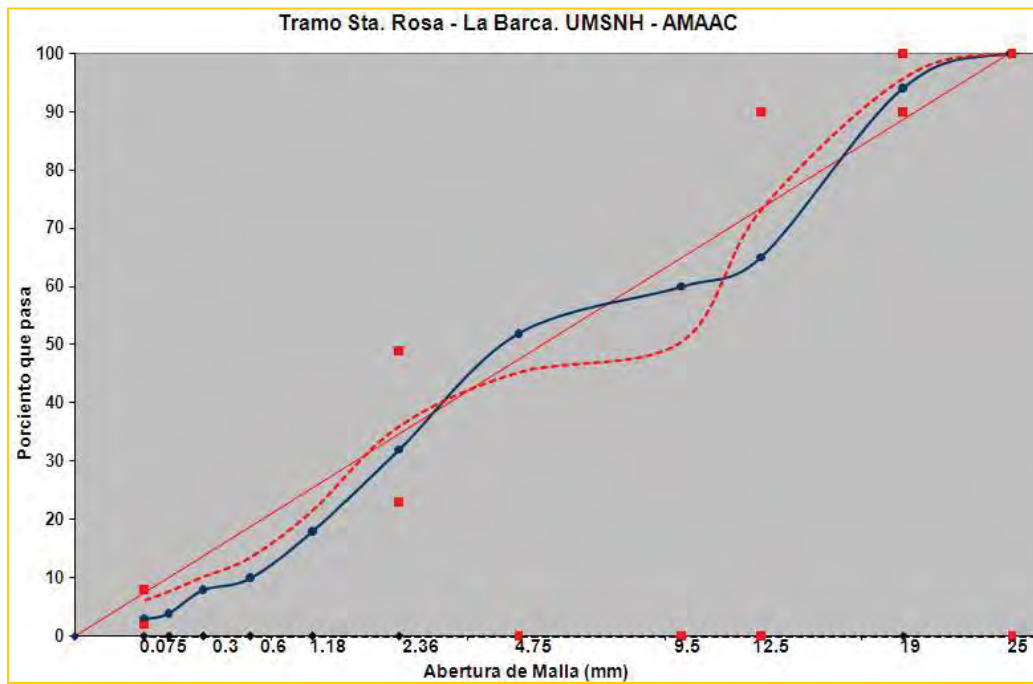


Fig. 6.75: Mezcla elaborada el día 12 de marzo de 2010 y tendida en el km 15+500 franja 2.

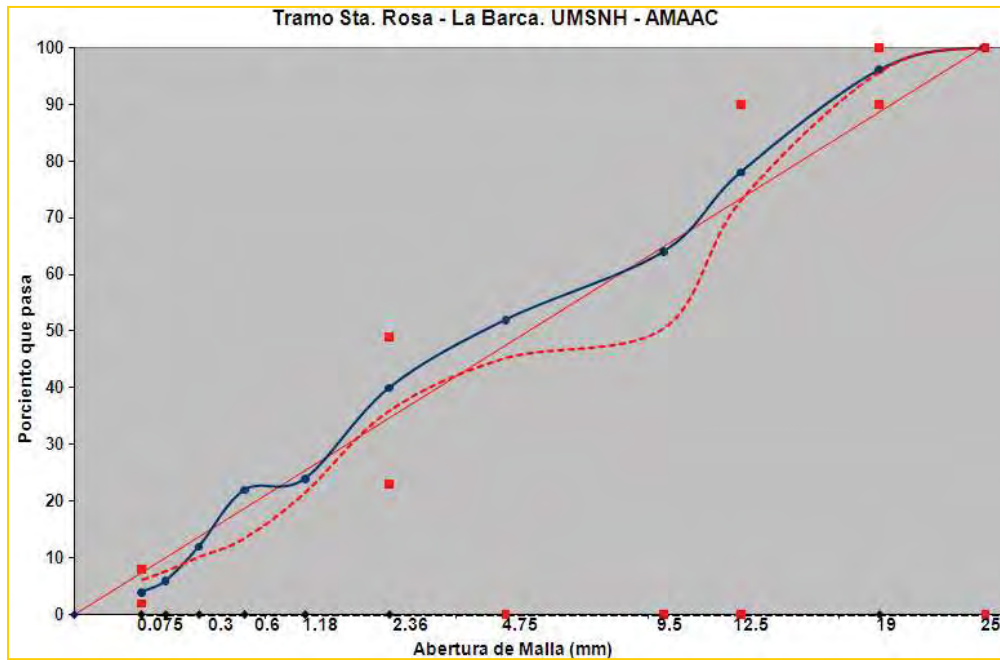


Fig. 6.76: Mezcla elaborada el día 20 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+950 franja 4.

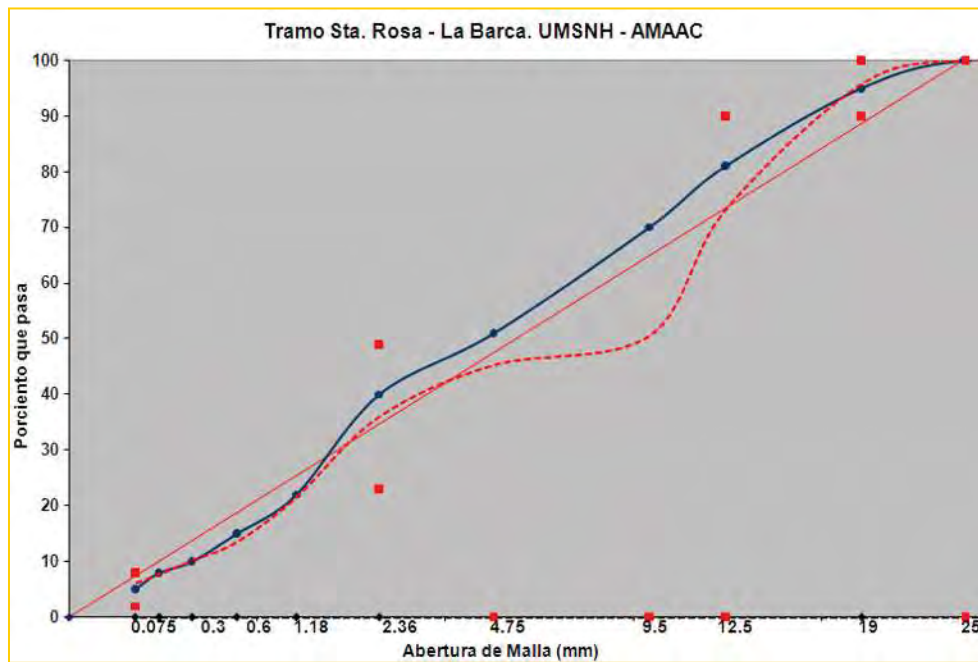


Fig. 6.77: Mezcla elaborada el día 22 de marzo de 2010 y tendida en el km 15+600 franja 2.

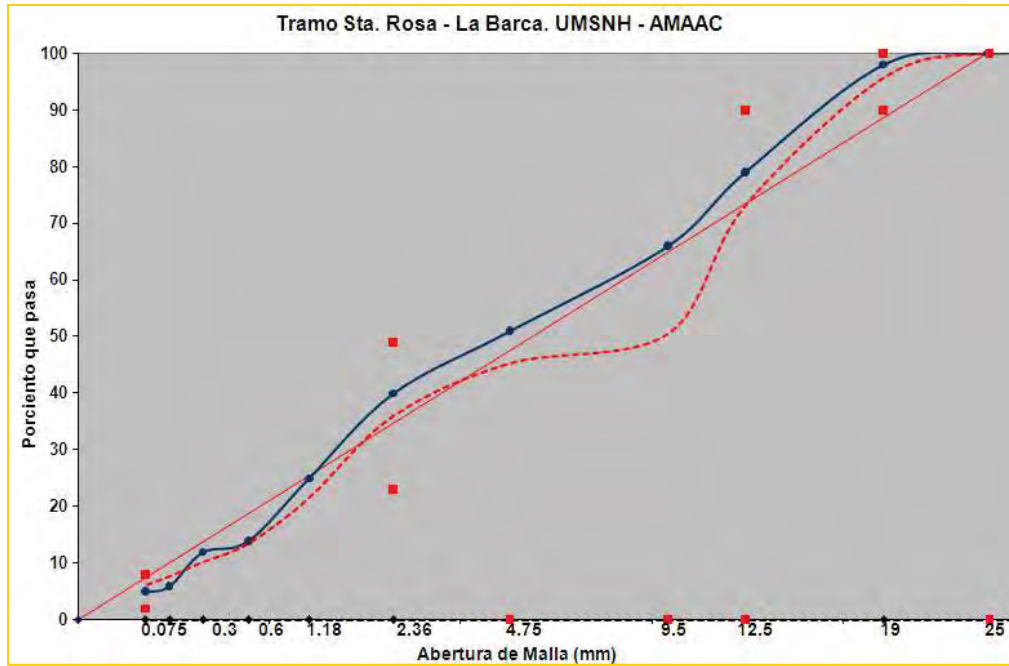


Fig. 6.78: Mezcla elaborada el día 23 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+760 franja 3.

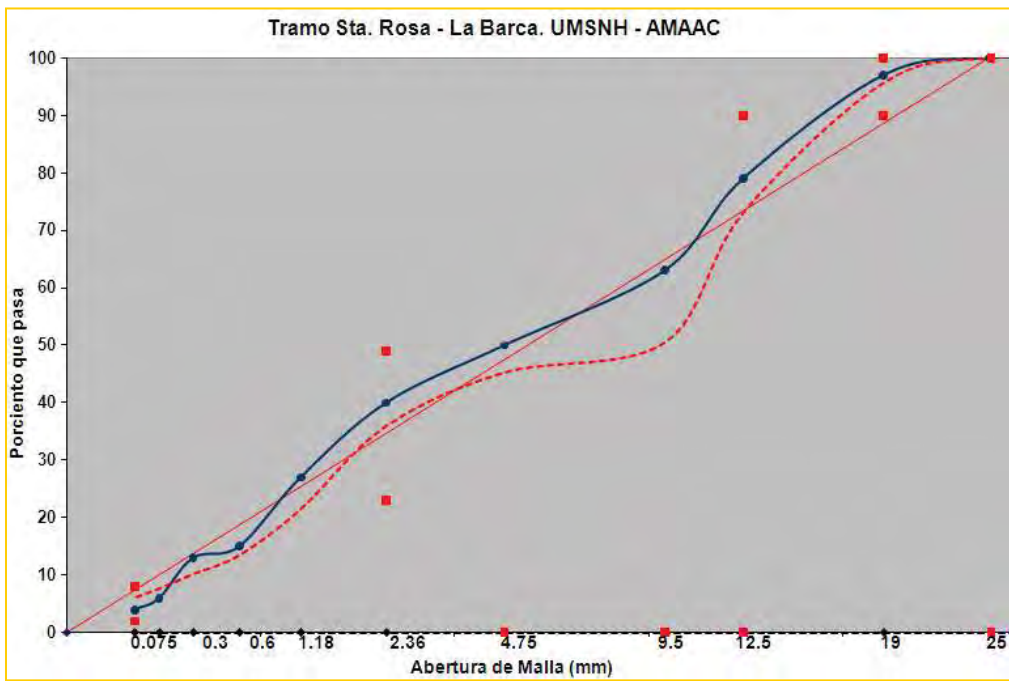


Fig. 6.79: Mezcla elaborada el día 25 de marzo de 2010 y tendida en el km 14+820 franja 2.

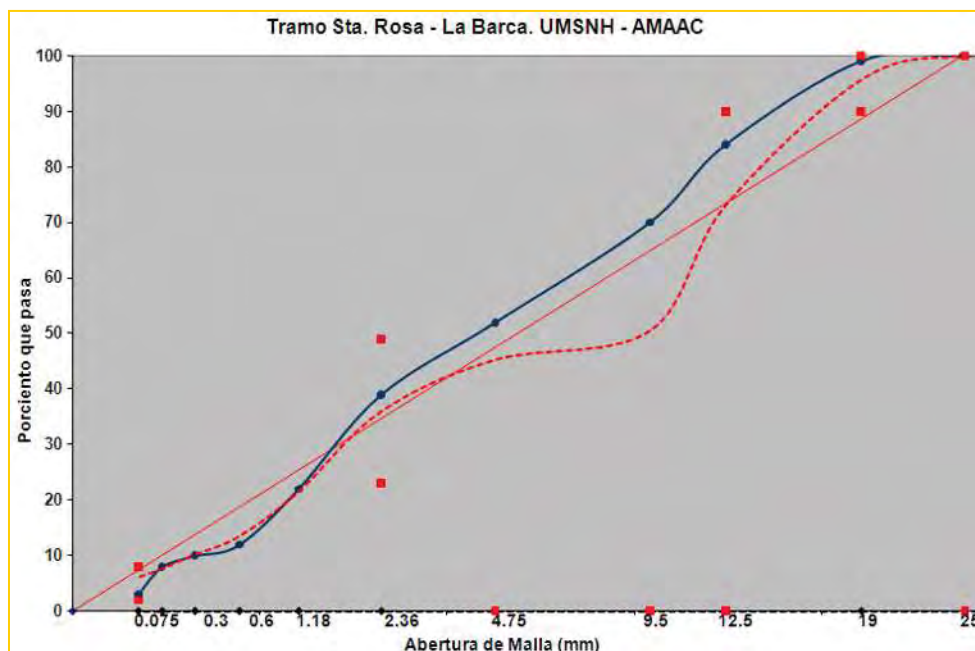


Fig. 6.80: Mezcla elaborada el día 27 de marzo de 2010 y tendida en el km 15+730 franja 1.

Se puede observar que la granulometría no corresponde a la de diseño ya que hay cambios importantes en los tamaños de #4, 3/8" y 1/2", sin embargo la granulometría de la mezcla obtenida en planta ha permanecido constante, por lo tanto una actuación inmediata en esta etapa hubiera sido un rediseño de la mezcla con la granulometría existente.

La granulometría obtenida tiene la tendencia hacia la línea de máxima densidad, por lo que se espera que la mezcla tenga mayor densidad, sin embargo esto no sucede, al contrario tiene densidad menor a la de diseño.

➤ *Deformación.*

De manera representativa se analizaron dos muestras obtenidas en el tramo en diferente fecha, la primera se probó únicamente en la rueda de Hamburgo y la segunda en Hamburgo y APA con la cual se pudo realizar una ligera comparación entre ambos procedimientos.

La especificación para la Hamburgo y con cemento asfáltico PG 76 – 22 indica que en un mínimo de 20000 pasadas se debe obtener una deformación máxima de 10mm. Mientras que para el APA para un nivel de tránsito alto se debe presentar una rodera máxima de 4.0mm a 8000 ciclos de las ruedas del APA.

- Rueda cargada de Hamburgo.

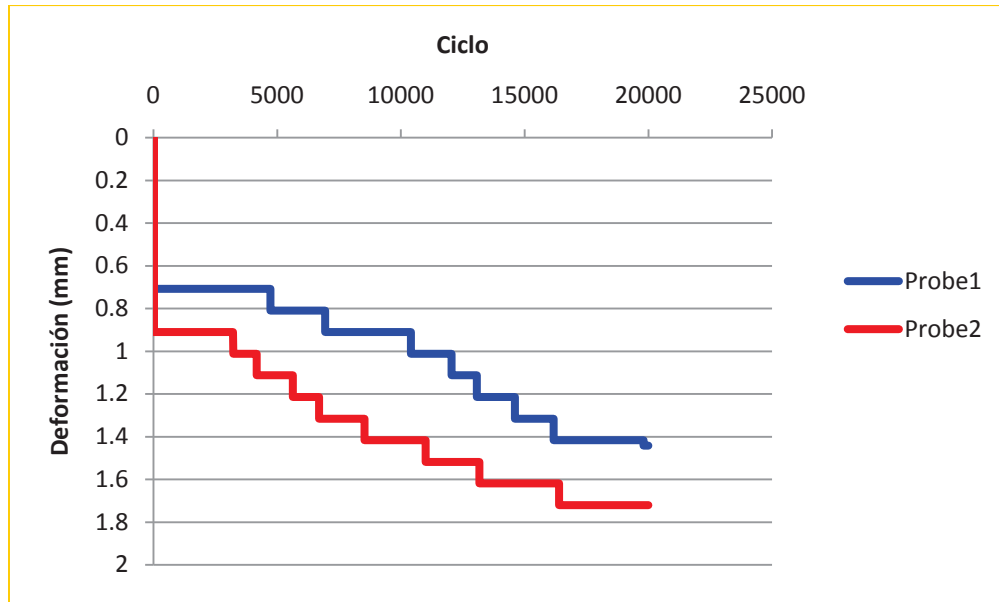


Fig. 6.81: Mezcla elaborada el día 23 de diciembre de 2009.

Para la muestra obtenida en el tramo el día 23 de diciembre de 2009 se obtuvo deformación de 1.44171582mm en la probeta uno y 1.71994168mm en la probeta dos, ambos resultados obtenidos en 20000 ciclos de carga.

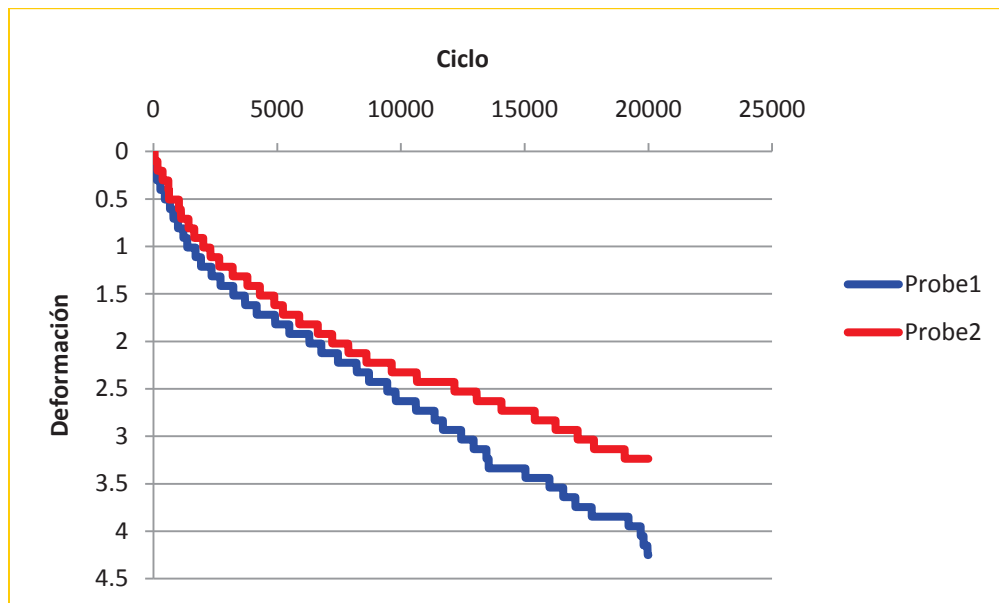


Fig. 6.82: Mezcla elaborada el día 25 de marzo de 2010.

Para la muestra obtenida en el tramo el día 23 de diciembre de 2009 se obtuvo deformación de 4.24926768mm en la probeta uno y 3.23753728mm en la probeta dos, ambos resultados obtenidos en 20000 ciclos de carga.

- APA (Asphalt Pavement Analyzer)

El objetivo es predecir con gran certeza el comportamiento en campo de la mezcla asfáltica, la función de este equipo es similar a la rueda cargada de Hamburgo mide la susceptibilidad a la deformación permanente por rodadura de una mezcla asfáltica por medio de la aplicación de líneas de carga, a los especímenes de prueba compactados, la diferencia con la anterior es que la transmisión entre la rueda de carga y el espécimen se hace a través de mangueras presurizadas. Este dispositivo es menos común que la rueda de Hamburgo ya que es más costoso.

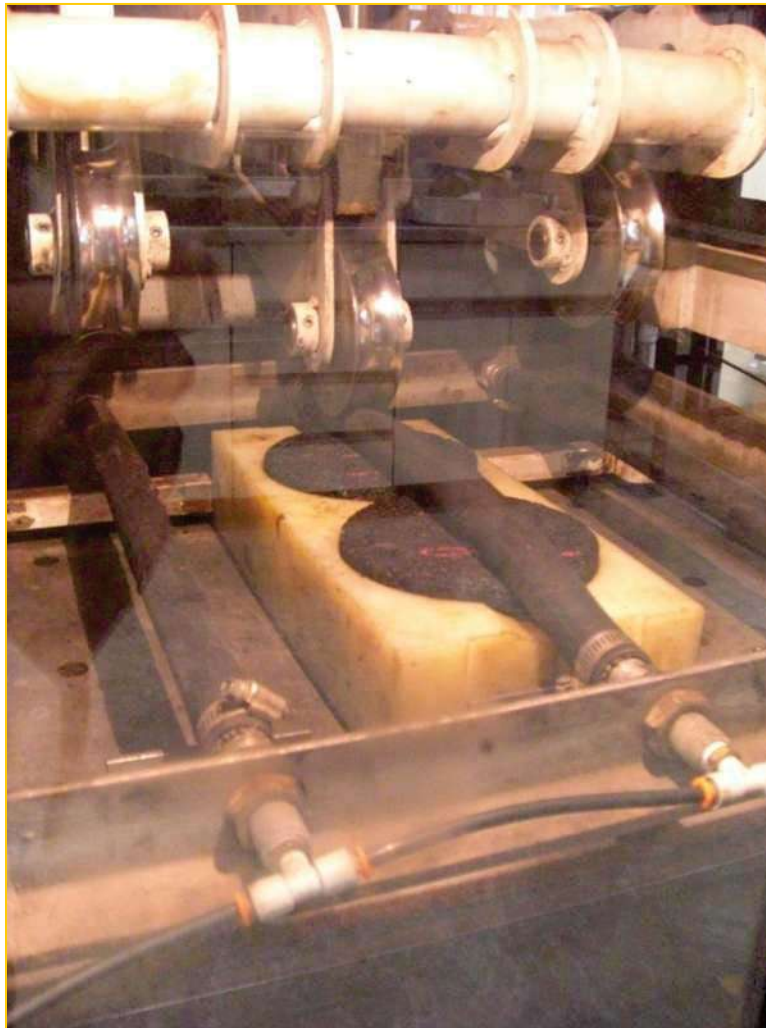




Fig. 6.83: Mezcla elaborada el día 25 de marzo de 2010 sometida a APA.

En la Fig. 6.83 se muestran dos probetas de mezcla asfáltica probadas en el APA, no se muestran los resultados numéricos ya que su análisis se llevó a cabo en el IMT y no se proporcionaron los resultados. Sin embargo se puede observar claramente que no se presentó deformación visible al ojo humano, solamente en las esquinas.

Por lo tanto observando los resultados obtenidos con Hamburgo y APA se concluye primero que la rueda cargada de Hamburgo es más agresiva que el APA y segundo que la mezcla asfáltica producida presenta excelente resistencia a la deformación permanente y al daño inducido por humedad determinado también por Hamburgo.

6.4.2 Obtención de núcleos de la mezcla asfáltica tendida y compactada.

Los días 19, 20 y 21 de mayo de 2010 se obtuvieron núcleos de mezcla asfáltica tendida y compactada de los 4 km del tramo, la extracción se llevo a cabo por parte de elementos de la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT centro Jalisco, del IMT y un servidor por parte de la UMSNH y la AMAAC.

En estaciones de 200m extrayendo en cada una 3 núcleos para su posterior análisis, además se realizó prueba de permeabilidad y deformación. Importante aclarar que las deformaciones obtenidas son solo por procedimiento constructivo y se determinó con una viga de tres metros encontrando deformaciones muy grandes principalmente en las juntas donde se traslapa una faja con otra.



Fig. 6.84: Deformaciones hasta de 1.8cm en las juntas longitudinales.



Fig. 6.85: Brigada trabajando en extracción de núcleos, permeabilidad y deformación.

Los núcleos extraídos fueron puestos a disposición del IMT de los cuales ya se encuentra disponible información sobre espesores de mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño, sin embargo está pendiente que se entregue información sobre el TSR y deformación permanente en APA.

➤ *Espesores.*

Los espesores de los núcleos se determinaron mediante la limpieza de estos y la identificación de las capas de mezcla asfáltica que componen el pavimento, recordemos que las especificaciones indican dos capas de 10cm de espesor de base asfáltica con Tamaño máximo del agregado de 1 ½" y cemento asfáltico AC 20 convencional, además de una capa estructural de mezcla asfáltica de granulometría densa de alto desempeño de 6cm y como capa de rodadura una mezcla tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) de 4cm de espesor. Esta última aun no se encuentra considerada en los núcleos y no es parte de esta investigación. Los espesores indicados en esta sección son ya compactados.



Fig. 6.86: Núcleo de la estación 13+200 con espesor mezcla densa de 5.5cm y dos capas de base asfáltica.

Tabla 6.10: Espesores de la carpeta, obtenidos de extracciones.

Estación	Cadenamiento	Espesor (cm)
1	13+000	6.8
2	200	5.8
3	400	6.5
4	600	6
5	800	5.6
6	14+000	6.8
7	200	6.5
8	400	6.2
9	600	7.3
10	800	7.5
11	15+000	5.8
12	200	6.5
13	400	5.5
14	600	6.7
15	800	7
16	16+000	7.5
17	200	5.8
18	400	6.8
19	600	7.1
20	800	7.6
21	17+000	6.9

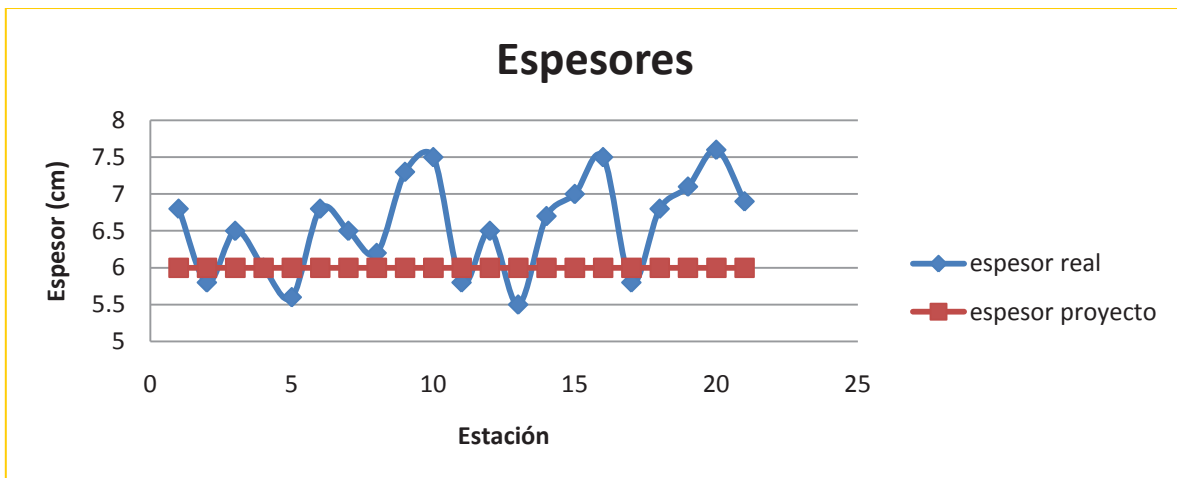


Fig. 6.87: Espesores.

➤ *% de compactación.*

Para obtener la volumetría de los núcleos extraídos con los procedimientos que indica el Protocolo AMAAC es imposible ya que para obtener el Gmm de la mezcla se requiere que la mezcla este suelta y en los núcleos ya esta compactada, además en caso de que se caliente y se disgregue la mezcla, el Gmm obtenido no será representativo pues quedaran pequeños grumos con aire atrapado, así mismo al momento de la extracción de los núcleos la broca atraviesa y corta el agregado mineral dejando sin cubrimiento de asfalto.

El porcentaje de compactación se debe revisar en el momento de la construcción y guardando una muestra de mezcla suelta que representa a la que se está tendiendo. Así con la muestra suelta se obtiene el Gmm y con los núcleos de mezcla obtenidos se determina el Gmb estando ahora si en posibilidades de calcular el % de Vacíos de aire y con ellos determinar el porcentaje de compactación.

7 Conclusiones

El conocer la historia de las mezclas asfálticas permite determinar el origen de los grandes cambios realizados en la caracterización de los materiales, en los tipos de mezcla y en los métodos de diseño de esta última. En México estos cambios, más allá de mejorar la calidad de un producto, han sido motivo de la necesidad para mantener los caminos de manera satisfactoria. Si se busca una verdadera mejora en la calidad se requiere de un cambio radical de manera que al garantizar las características adecuadas de los materiales se obtengan pavimentos cómodos, seguros y durables.

Con base en lo observado en el procedimiento constructivo y en los resultados del laboratorio aquí expuestos, se concluye lo siguiente: El diseño de la mezcla asfáltica, el procedimiento de mezclado, carga, tendido y compactado en el tramo Sta. Rosa – La Barca del km 13+000 al 17+000 NO ES REPRESENTATIVO DEL PROTOCOLO AMAAC.

A pesar del resultado no satisfactorio en la calidad de la mezcla asfáltica elaborada en el tramo de prueba en cuestión, con las experiencias adquiridas en el mismo y del análisis del estado del arte se determina que actualmente en México se cuenta con el equipo y capacidad técnica para el diseño y la construcción de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño como lo indica el protocolo AMAAC.

Para poder aplicar de manera adecuada el PROTOCOLO AMAAC se requiere principalmente que el gobierno, el proyectista, el constructor y el supervisor busquen un mismo objetivo, hacer las cosas bien.

Un gran inconveniente es que la construcción de la mayoría de las obras viales se rige por dos factores importantes que son la rapidez y la economía. De esta manera el equipo de construcción, el ejemplo representativo en el tramo es la planta de mezclado, se desarrolla pensando en estos dos factores y se olvida la calidad.

Más allá del diseño, del proceso constructivo y del control de calidad empleado, se observa en los resultados de la mezcla asfáltica, principalmente en deformación y resistencia al daño por humedad, que cumplen con los parámetros o especificaciones indicados en el protocolo AMAAC, este hecho es atribuible las

calidades del asfalto y del pétreo pero principalmente a la selección del primero según su grado de desempeño.

Prácticamente se concluye que los métodos de diseño como el Marshall y Hveem son obsoletos principalmente cuando se diseñan mezclas con asfalto PG o simplemente con algún modificante. La principal especificación del método Marshall es la estabilidad mínima y un intervalo de valores de flujo; el valor de la estabilidad es muy fácil que se alcance con asfaltos PG o modificados mientras que el valor de flujo será en ocasiones menor al permitido y esto significa dos cosas: el asfalto se encuentra envejecido y por lo tanto está rigidizado o el asfalto es de excelente calidad. Por lo anterior es importante la caracterización del asfalto según su grado de desempeño y de la misma manera realizar el diseño de la mezcla con el Protocolo AMAAC.

Para una correcta aplicación del protocolo AMAAC se recomienda lo siguiente:

- Elaborar la mezcla de diseño con al menos tres tipos de agregados pétreos y dando seguimiento al procedimiento correspondiente.
- No confundir Protocolo AMAAC con SUPERPAVE.
- Revisar la especificación indicada en el Protocolo AMAAC sobre la prueba de Azul de Metileno en fillers mediante la caracterización del material pétreo pasa malla #200 de materiales típicos en México y su comportamiento con el asfalto.
- Estandarizar y certificar los laboratorios dedicados al diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño.
- Garantizar la aplicación de la normativa aplicable.
- Utilizar plantas de producción discontinua que garanticen la uniformidad en temperatura, granulometrías y contenido de asfalto de la mezcla elaborada.
- Empleo de dispositivos de carga, transporte y tendido adecuados que garanticen la uniformidad en la mezcla y en sus espesores ya tendida.
- Realizar un tramo de prueba de longitud adecuada donde se compacte la mezcla y se revise su grado de compactación al instante. Para ello se debe obtener una muestra de mezcla suelta a la que se le obtenga la densidad teórica máxima.
- Determinar un procedimiento para obtener el grado de compactación de mezcla asfáltica tendida y compactada de la cual no se tenga muestra suelta y que sea compatible con los parámetros de análisis de volumetría del Protocolo AMAAC.

Sobre todo no tenerle miedo al cambio ni a la tecnología, pero aplicar solamente lo que mejorará la infraestructura mexicana.

8 Bibliografía.

1. Principales estadísticas del sector comunicaciones y transportes 2008; Dirección General de Planeación, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).
2. Longitud de la red carretera según superficie de rodamiento, serie anual de 1997-2007; Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).
3. Ing. Ignacio Cremadez Ibáñez ¡EL PAVIMENTO NO SIRVE!; Novedades Técnicas Pagina web AMAAC.
4. The History of Asphalt; National Asphalt Pavement Association (NAPA).
5. NATIONAL ASPHALT ROADMAP; Asphalt Pavement Research and Technology; Federal Highway Administration, American Association of State Highway and Transportation Officials, National Asphalt Pavement Association, Asphalt Institute, National Stone, Sand, & Gravel Association.
6. Paul Garnica Anguas, Mayra Flores Flores, José Antonio Gómez López y Horacio Delgado Alamilla; Publicación Técnica No. 267: Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas; Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Sanfandila, Qro., 2005.
7. Alejandro Padilla Rodríguez, capítulo 3 Mezclas Asfálticas; Publicación UPC.
8. Dr. Jorge Alarcón Ibarra, Apoyo didáctico.
9. Dirección General de Conservación de Carreteras; Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).
10. Publicación Técnica No. 104: Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de diseño y tendencias; Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Sanfandilla, Qro., 1998.
11. Publicación Técnica No. 271: Análisis Comparativo de los métodos Marshall y Superpave para Compactación de Mezclas Asfálticas; Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Sanfandilla, Qro., 2005.
12. Pavement Surface Evaluation and Rating (PASER) Asphalt Roads Manual, Transportation Information Center, University of Wisconsin-Madison.

13. Ing. Ignacio Avilés; La importancia y utilidad de las exposiciones de maquinaria para construir caminos, la exposición de maquinaria de Atlantic City en enero de 1930; Empresa Editorial de Ingeniería y Arquitectura, 1930.
14. Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C. 1994; Historia de los Caminos de México, Tomo 1, época prehispánica, época colonial.
15. Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C. 1994; Historia de los Caminos de México, Tomo 2 siglo XIX.
16. Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.N.C. 1994; Historia de los Caminos de México, Tomo 3 siglo XX.
17. Ing. José Rivera, Como se inicio el Programa de Caminos de México en 1925.
18. Roads to serve de Nation, The Story of Road Development in the United States.
19. beyondRoads.com, The History of Asphalt.
20. NAPA, History of Asphalt.
21. Rodrigo Borla; Dos mil años de chapopote; La Jornada, 18 de marzo de 2008.
22. Ing. Manuel Álvarez y Álvarez; Antecedentes históricos de las actividades exploratorias de Petróleos Mexicanos; Alternativas tecnológicas 12, Academia Mexicana de Ingeniería, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, 1984 – 1985.
23. Ing. José Luis García Luna H; El Asfalto en México; IV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, México, 1987.
24. M. en I. Juan M. Orozco y O, Ing. Juan E. Ramos Medina e Ing. Gabriel Gutiérrez Rocha; Calidad y aprovechamiento de los asfaltos en México; IV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, México 1987.
25. Wikipedia, History of Road Transport.
26. Ing. Fernando Estrada Martínez, Asfaltos producidos por PEMEX Refinación, PEMEX 1998.
27. SCT, Subsecretaria de Infraestructura, Dirección General de Servicios Técnicos; Guía general tentativa para el uso de los nuevos asfaltos que produce PEMEX; junio de 1996.
28. Leonardo Manríquez Olmos, Investigación de asfaltos, II Seminario, Planta de Asfalto del Distrito Federal.
29. Historia de la Planta de Asfalto del Distrito Federal, 2000, Casa editorial Oros.
30. M. en I. Juan Manuel Orozco y Orozco; Breves notas sobre los antecedentes y el desarrollo de la tecnología de los pavimentos; Memoria del Seminario Internacional de Pavimentos, 1991, Instituto Mexicano del Transporte.

31. Ing. Juan E. Ramos Medina; Antecedentes y desarrollo histórico de los pavimentos en México; Memoria del Seminario Internacional de Pavimentos, 1991, Instituto Mexicano del Transporte.
32. Ing. Juan E. Ramos Medina; Los asfaltos para pavimentación de carreteras en México, junio de 1999.
33. Ing. Manuel Zarate Aquino, La construcción de pavimentos en México, VII Reunión Nacional de Ingeniería de Vías Terrestres, Querétaro, Qro. Mayo de 1986.
34. Ing. René Etcharren G, Etapas de la Red Nacional de 1925 hasta 1973.
35. Ing. Daniel Díaz Díaz, Planeación, Construcción y Conservación de La Red de Carreteras.

9 Anexos

A. Especificaciones de proyecto.

Ampliación a ambos lados carretera en su cuerpo actual, la sección actualmente cuenta con un ancho variable de 12.00 m, se contempla un ancho de corona de 21.00 m, la sección con ancho de corona de 21.00 m contará con una calzada de circulación de 14.00 m de ancho con acotamientos externos de 2.50 m a cada lado, y acotamientos interiores de 0.50 m y una faja central de 1.0 m, en esta última se alojara la barrera central.

La sección estructural del pavimento nuevo a considerar se conforma de una capa de base hidráulica de 0.30 m., la base asfáltica es de 0.20 m. y una carpeta de concreto asfáltico de 0.10 m. Para proporcionar un drenaje adecuado, será necesario dar un bombeo del 2% hacia los extremos de la sección considerada.

➤ *Base hidráulica.*

Sobre la capa subrasante en la zona de ampliación se construirá una capa de base hidráulica de cero punto treinta (0.30) metros de espesor, utilizando material procedente del banco de préstamo indicado para este fin en el cuadro de bancos de este proyecto.

El material que conforme esta capa se deberá compactar al 100% de su peso volumétrico seco máximo (PVSM) de la prueba AASHTO modificada (cinco capas) citada en el Capítulo 6.01.03.009-M-04 correspondiente al método de prueba 6.01.01.002.K.05 del Libro 6.01.03 de las Normas para Muestreo y Pruebas de Materiales, Equipos y Sistemas; Carreteras y Aeropistas; Pavimentos.

Los materiales utilizados deberán ser del tipo indicado en la cláusula 073-D del Libro 3, Parte 01, Título 03; además éstos tendrán que cumplir con las Normas de Calidad especificadas en el inciso 009-C.06 del Libro 4, Parte 01, Título 03 y para su ejecución se deberán seguir todos los lineamientos indicados en la cláusula 074-F del Libro 3, Parte 01, Título 03.

➤ *Recuperación del pavimento existente para mejoramiento de base hidráulica.*

En los tramos que ordene la Dependencia se realizarán las operaciones que a continuación se indican para mejoramiento de la base hidráulica: mediante el equipo adecuado se cortará en frío el material que constituye el pavimento existente hasta veinte (20) centímetros de profundidad; con el equipo del material recuperado se disgregará y mezclará con el material nuevo procedente del banco que elija el contratista para conformar el espesor de veinte (20) centímetros compactos; posteriormente se homogeneizará con motoconformadora o similar, agregándole agua en la proporción que determine el porcentaje de humedad óptima, se compactará la superficie descubierta al cien por ciento (100%). La mezcla así obtenida, será tendida en el ancho de corona del cuerpo existente, procediendo a perfilar y se compactará al cien por ciento (100%) respecto al peso volumétrico seco máximo (PVSM) obtenido en la prueba AASTHO modificada.

Al producto de la recuperación de la carpeta asfáltica existente previamente disgregada con el equipo y maquinaria que permita esta operación se le adicionará el 30% de agregados pétreos nuevos y deberán cumplir con los requisitos contenidos en la Normativa para la Infraestructura del Transporte, para materiales de base hidráulica, con agregados de tamaño máximo de treinta y ocho (37.5) milímetros y mínimos de (9.5) milímetros con sus respectivos intermedios.

➤ *Riego de Impregnación.*

Una vez terminada la operación de construcción de la base hidráulica incluyendo la zona de ampliación y a satisfacción de la Secretaría se procederá a ejecutar el barrido de la superficie en todo el ancho.

Se limpia de polvo la base hidráulica, se aplicará el riego de impregnación con emulsión asfáltica en proporción de uno punto cero (1.0) lt/m² en todo el ancho de la sección así como en los taludes del material que formen el pavimento.

El producto asfáltico (emulsión asfáltica) deberá ser del tipo mencionado en la cláusula 076-D del Libro 3, Parte 01, Título 03, así mismo deberá cumplir con las Normas de Calidad establecidas en el inciso 011-B.04.f del Libro 4, Parte 01, Título 03, y para su aplicación con la cláusula 080-F del Libro 3, Parte 01, Título 03.

➤ *Riego de liga para base asfáltica.*

Una vez que el riego de impregnación cumpla con lo establecido en el inciso anterior y que la Dependencia lo autorice, se procederá a barrer la superficie con la finalidad de eliminar el polvo y materias extrañas, se procederá a la aplicación del riego de liga con emulsión asfáltica en una proporción de cero punto seis (0.6) lt/m^2 en la capa de base hidráulica impregnada y otro riego de liga sobre la primera capa de base asfáltica para recibir su segunda capa.

El producto asfáltico (emulsión asfáltica) deberá ser del tipo mencionado en la cláusula 076-D del Libro 3, Parte 01, Título 03, así mismo deberá cumplir con las Normas de Calidad establecidas en el inciso 011-B.04.f del Libro 4, Parte 01, Título 03, y para su aplicación con la cláusula 080-F del Libro 3, Parte 01, Título 03.

➤ *Base asfáltica.*

Sobre la base hidráulica terminada se construirá una capa de Base Asfáltica de **0.20 m** de espesor, dicha capa se elaborará en planta y en caliente con materiales procedentes de los bancos que elija el contratista y cemento asfáltico AC-20 con una proporción de 130 kg/m^3 de material pétreo seco y suelto de tamaño máximo de 38.1 mm (1 1/2").

El tendido se realizará con máquina terminadora en dos capas de 10 cm cada una, dichas capas se compactarán al 95 % de su Peso Volumétrico determinado en la Prueba Marshall.

El equipo de trituración y cribado deberá contar con lo menos con un dispositivo para el despolve, procurando que el material fino pase por la malla 200, resulte menor del 5% ; adicionalmente cuando se trate de materiales triturados parcialmente se deberá garantizar que dichos materiales tengan por lo menos del

orden del 30 % de trituración, por lo que es recomendable en su caso contar con un primario, un secundario y dos tolvas dosificadoras de manera que se proporcione una buena granulometría.

Dado que se utiliza cemento asfáltico AC-20, la mezcla deberá realizarse a una temperatura no menor de 140° C y no mayor de 165° C. La mezcla al momento de colocarla en la pavimentadora deberá tener una temperatura no menor a 135° C. La temperatura se medirá en el camión antes de descargar en la máquina pavimentadora. La compactación se efectuará inmediatamente después de tendida la mezcla y antes de que su temperatura baje a menos de 130° C.

➤ *Riego de liga para carpeta de concreto asfáltico.*

Sobre la superficie de la capa de base asfáltica debidamente terminada y que la Dependencia lo autorice, se aplicará en todo el ancho de la sección un riego de liga con emulsión asfáltica en una proporción de cero punto seis (0.6) lt/m² en la capa de base hidráulica.

El producto asfáltico (emulsión asfáltica) deberá ser del tipo mencionado en la cláusula 076-D del Libro 3, Parte 01, Título 03, así mismo deberá cumplir con las Normas de Calidad establecidas en el inciso 011-B.04.f del Libro 4, Parte 01, Título 03, y para su aplicación con la cláusula 080-F del Libro 3, Parte 01, Título 03.

➤ *Carpeta de concreto asfáltico.*

Sobre la capa de base asfáltica debidamente terminada y después de la aplicación del riego de liga, se construirá una carpeta de concreto asfáltico de cero punto diez (0.10) metros de espesor, utilizando material procedente del banco de préstamo propuesto por el licitante y cemento asfáltico, según la especificación particular respectiva.

B. Carpeta de concreto asfáltico de alto desempeño tamaño máximo nominal de ¾" (19 mm).

➤ *Contenido*

Esta Especificación Particular contiene las características de calidad que deberán considerarse para la construcción de Carpeta Asfáltica de Granulometría Densa de Alto Desempeño, que es parte constitutiva del Pavimento Asfáltico.

➤ *Definición*

Las carpetas asfálticas con mezcla en caliente, son aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos y cemento asfáltico

Las carpetas asfálticas con mezcla en caliente se construyen para proporcionar al usuario una superficie de rodamiento uniforme, bien drenada, resistente al derrapamiento, cómoda y segura. Cuando son de un espesor mayor o igual que cuatro (4) centímetros, las carpetas de granulometría densa tienen además la función estructural de soportar y distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento.

La mezcla asfáltica de alto desempeño, es una mezcla especialmente diseñada y construida para resistir deformaciones permanentes, fatiga y tener mayor resistencia a los agentes ambientales.

➤ *Requisitos de calidad de los materiales*

Agregado Grueso.

El agregado grueso (material pétreo retenido en la malla No. 4) deberá ser de un banco aprobado por la Dependencia, triturado totalmente a un tamaño máximo nominal de 19 mm ($\frac{3}{4}$ "), debiendo cumplir este con las especificaciones que se muestran en la Tabla 1.

Tabla A.1: Características de calidad del agregado grueso.

Característica	Norma	Especificación
Desgaste Los Ángeles, %	ASTM C131	30 máx. (capas estructurales) 25 máx. (capas de rodadura)
Desgaste Microdeval, %	AASHTO TP 58-99	18 máx. (capas estructurales) 15 máx. (capas de rodadura)
Intemperismo acelerado, %	AASHTO T 104	15 máx. para sulfato de sodio 20 máx. para sulfato de magnesio
Caras fracturadas, % (2 caras o más)	ASTM D 5821	90 mín.
Partículas alargadas, %	ASTM D 4791	3 a 1 %, 15 máx.
Partículas lajeadas, %	ASTM D 4791	3 a 1 %, 15 máx.
Adherencia con el asfalto, % de cubrimiento	Recomendación AMAAC RA-08/2008	90 mín.

*Todas las pruebas deberán ser desarrolladas por un laboratorio autorizado y reconocido previamente por la Dependencia.

La licitante en su propuesta debe incluir un croquis de localización de los bancos de materiales propuesto indicando la distancia de acarreo a la planta de asfalto, así como el diagrama de flujo de producción de agregados pétreos

Agregado Fino.

El agregado fino (material que pasa la malla No 4) constituirá parte del “mastic asfáltico” y deberán provenir de un banco aprobado por la dependencia y cumplir con las especificaciones marcadas en la tabla 2.

Tabla A.2: Propiedades del Agregado Fino

Característica	Norma	Especificación
Equivalente de arena, %	ASTM D 2419	50 min. (capas estructurales) 55 min. (capas de rodadura)
Angularidad, %	AASHTO T 304	40 mín.
Azul de metileno, mg/g	Recomendación AMAAC RA-05/2008	15 máx. (capas estructurales) 12 máx. (capas de rodadura)

*Todas las pruebas deberán ser desarrolladas por un laboratorio autorizado y reconocido previamente por la Dependencia.

➤ *Cemento asfáltico.*

El cemento asfáltico se debe seleccionar en función de la temperatura máxima y mínima que se esperan en el lugar de aplicación considerando el ajuste correspondiente por tránsito de acuerdo a la Norma de la SCT N-CMT-4-05-004/05 Calidad de materiales Asfálticos Grado PG.

➤ *Diseño de la mezcla.*

El diseño de la mezcla se realizará en un laboratorio aprobado por la dependencia y conforme al procedimiento indicado en el Protocolo de diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño de la Asociación Mexicana del Asfalto PA – MA 01/2008. Considerando un Nivel 4 de diseño de mezclas.

El concreto asfáltico deberá presentar un comportamiento de resistencia a esfuerzos de tensión (TSR) de tal forma de tener una resistencia mínima remanente de 80 % conforme a la recomendación AMAAC RA 04/2008. Considerando un ciclo de congelamiento de 16 hrs el cual deberá ser aplicado antes de realizar la prueba. Las temperaturas de mezcla y compactación deberán ser las recomendadas por el proveedor del producto asfáltico conforme a la viscosidad rotacional generada.

Previo a la compactación de los especímenes en el laboratorio la mezcla deberá curarse en un horno, a la temperatura de compactación, 2.00 horas para cuando los agregados presenten una absorción combinada menor o igual a 2.5% y 4.00 horas para absorción mayor a 2.5%.

Para la fabricación de los especímenes, la mezcla asfáltica deberá ser compactada en el Compactador Giratorio Superpave de acuerdo al número de giros correspondientes a los ejes equivalentes de diseño tomando en cuenta lo especificado en la Recomendación AMAAC RA 06/2008, con un ángulo de 1.25° y 600 kpa de presión. Ver tabla 3.

La selección del contenido de asfalto estará en función del cumplimiento de las propiedades volumétricas indicadas en la tabla No. 4.

La granulometría de la mezcla asfáltica deberá apegarse a la PA-MA 01/2008, en el eje horizontal se graficará la abertura de la malla en mm elevada a la 0.45 potencia y en el eje vertical el por ciento que pasa, alojándose dentro de los puntos de control, La línea de Máxima densidad es una línea recta que se traza del tamaño máximo del agregado, del 100% de material que pasa al origen.

Tamaño Máximo: Un tamaño mayor que el tamaño máximo nominal.

Tamaño Máximo Nominal: Un tamaño mayor que la primera malla o tamiz que retiene más del 10% de agregado.

- *Límites Granulométricos Superpave para Tamaño Máximo Nominal 19 mm (3/4").*

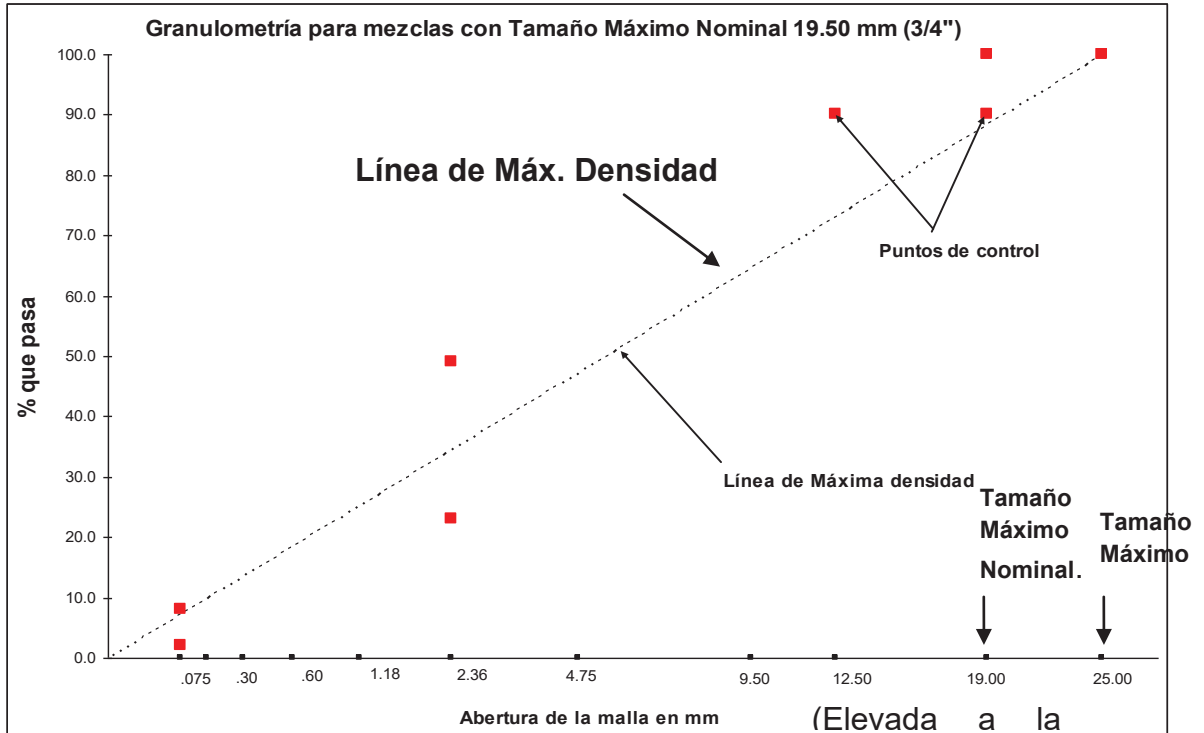


Tabla A.3: Energía de Compactación en e Compactador Giratorio Superpave*

ESALs de Diseño (millones)	Parámetros de Compactación		
	Nini	Ndiseño	Nmáx.
<0.3	6	50	75
0.3 a 3	7	75	115
3 a 30	8	100	160
≥ 30	9	125	205

Tabla A.4: Requerimientos Volumétricos Superpave.

Requerimientos para el Diseño Volumétrico de la Mezcla												
Nivel de tránsito	Densidad requerida (% de la Gravedad específica teórica máxima – Gmm)			Vacíos de agregado mineral mínimo en % - VMA					Vacíos llenos de asfalto en %	Relación filler asfalto		
	Nivel de compactación Giratoria			Tamaño nominal (mm)								
	Nini	Ndis	Nmax	37,5	25	19	12,5	9,5				
I Bajo	≤ 91,5		96	≤ 98	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	70 - 80	0,6 – 1,2	
II Medio	≤ 90,5									65 - 78		
III Alto	≤ 90,5									65 - 78		
IV Muy alto	≤ 89									65 - 75		

Tabla A.5: Puntos de Control en la Granulometría Superpave Para Tamaño Máximo Nominal de ¾" (19 mm).

Abertura de la malla	% que pasa	
	Mín.	Máx.
50.00 mm		
37.5 mm		
25.00 mm	100	
19.00 mm	90	100
120.5 mm		90
9.5 mm		
4.75 mm		
2.36 mm	23	49
0.075 mm	2	8

➤ *Construcción*

Clima.

No se permitirá aplicación sobre superficie que se encuentre mojada. La temperatura ambiente no deberá ser menor a quince 15 ° C en el momento de la aplicación. Una superficie húmeda es aceptable para la aplicación si se encuentra libre de agua estancada y si se esperan condiciones ambientales favorables.

Ejecución.

Una vez aplicado el riego de liga, se construirá una capa de carpeta asfáltica, con material pétreo proveniente de banco propuesto por el contratista a tamaño máximo nominal de 19 mm (3/4"), se colocará de acuerdo al espesor y a los niveles indicados en las secciones de proyecto. Se utilizará para su tendido una extendedora con equipo de sistema electrónico (sensores) para el control de espesores, la extendedora deberá garantizar una distribución y acomodo uniforme de la mezcla asfáltica, para dar las pendientes transversales y longitudinales de proyecto, por lo que el contratista deberá contar con el personal capacitado y el equipo especial con las características descritas anteriormente. Se compactará al noventa y siete por ciento (97%), mínimo, de la gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica compactada AASHTO T 166, ASTM D 2726.

La superficie de rodamiento deberá tener una textura y acabado uniforme, en caso de iniciar lluvia, el tendido deberá suspenderse inmediatamente sin argumentar que se tiende bajo riesgo de la constructora.

Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la dependencia, con las dosificaciones de los distintos tipos de materiales pétreos, asfálticos y en su caso, aditivos utilizados en la elaboración de la carpeta asfáltica en caliente, no se obtiene una mezcla con las características establecidas en el proyecto o aprobadas por la dependencia, se suspenderá inmediatamente el trabajo en tanto que el contratista las corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al contratista.

No se permitirá que los camiones que transportan la mezcla asfáltica, hagan maniobras que puedan distorsionar, disgregar u ondular las orillas de una capa recién tendida. En el caso de que por algún motivo esta situación llegue a suceder, el contratista reparará inmediatamente los daños causados, por su cuenta y costo.

Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la dependencia, la calidad de la mezcla asfáltica difiere de la establecida en el proyecto o aprobada por la dependencia, se suspenderá inmediatamente la producción en tanto que el contratista la corrija por su cuenta y costo. Los atrasos en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al contratista.

Una vez compactada la carpeta al 97% de su peso volumétrico compacto Gmb, verificados sus índices de perfil y, en su caso, hechas las correcciones, se volverán a nivelar las mismas secciones determinando las elevaciones de los mismos puntos ahí indicados para obtener las pendientes transversales entre ellos, y se medirán, en cada sección, las distancias entre el eje y las orillas de la corona, para verificar que esas pendientes y distancias estén dentro de las tolerancias que se indican en la tabla 7.

Tabla A.6: Tolerancias para Líneas y Pendientes.

Característica	Tolerancia
Ancho de la corona, del eje a la orilla	± 1 cm
Pendiente transversal	$\pm 0,5\%$

Equipo.

El equipo que se utilice para la construcción de carpetas asfálticas con mezcla en caliente, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para producir el volumen establecido en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, conforme al programa de utilización de maquinaria, siendo responsabilidad del contratista su selección.

Dicho equipo será mantenido en óptimas condiciones de operación durante el tiempo que dure la obra y será operado por personal capacitado. Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la dependencia, el equipo presenta deficiencias mecánicas o no produce los resultados esperados, se suspenderá inmediatamente

el trabajo en tanto que el contratista corrija las deficiencias, lo reemplace o sustituya al operador. Los atrasos en el programa de ejecución, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al contratista.

Planta de mezclado la mezcla asfáltica se elaborará en plantas mezcladoras que cuenten como mínimo con:

Tres tolvas para almacenar el material pétreo, protegidas de la lluvia y el polvo, con capacidad suficiente para asegurar la operación continua de la planta por lo menos durante quince (15) minutos sin ser alimentadas, y divididas en compartimentos para almacenar los materiales pétreos por tamaños.

Dispositivos que permitan dosificar los materiales pétreos por peso, los dispositivos permitirán un fácil ajuste de la dosificación de la mezcla en cualquier momento, para poder obtener la granulometría que indique el proyecto.

Dispositivos que permitan dosificar el cemento asfáltico, con una aproximación de más menos dos (± 2) por ciento de la cantidad requerida según el proporcionamiento de la mezcla.

Recolector de polvo.

Dispositivo para agregar finos.

Pavimentadoras.

Las pavimentadoras serán autopropulsadas, capaces de esparcir y precompactar la capa de carpeta que se tienda, con el ancho, sección y espesor establecidos en el proyecto, incluyendo los acotamientos y zonas similares. Estarán equipadas con los dispositivos necesarios para un adecuado tendido de la carpeta asfáltica, como son: un enrasador o aditamento similar, que pueda ajustarse automáticamente en el sentido transversal, ser calentado en caso necesario y proporcionar una textura lisa y uniforme, sin protuberancias o canalizaciones; una tolva receptora de la mezcla asfáltica con capacidad para asegurar un tendido homogéneo, equipada con un sistema de distribución mediante el cual se reparta la mezcla uniformemente frente al enrasador; y sensores de control automático de niveles.

Los dispositivos externos que se utilicen como referencia de nivel para los sensores de niveles, estarán colocados en zonas limpias de piedras, basura o cualquier otra obstrucción que afecte las lecturas.

➤ *Aceptación de la mezcla.*

Para la realización del control de calidad se deberá seguir el protocolo AMAAC PA-MA 02/2008 titulado “Control de Calidad para Mezclas Asfálticas de Alto Desempeño”. El control de calidad será de acuerdo al nivel de diseño de mezclas seleccionado para el proyecto y aprobado por la dependencia.

El Contratista será la responsable del aseguramiento y control de calidad, y La Dependencia en forma directa o a través de una empresa Supervisora realizará la verificación de calidad, por medio de muestreos y ensaye de materiales.

Las pruebas de verificación de calidad de la mezcla asfáltica serán realizadas en un laboratorio de campo, debiendo completarse en un tiempo razonable. Los procedimientos, tanto de muestreo como los de ensaye, deberán ser los mismos que los utilizados por la empresa Contratista.

La aceptación de la mezcla para la carpeta, de acuerdo a su contenido asfáltico y a su granulometría, podrá ser determinada por la Dependencia de acuerdo al método de muestreo que sea indicado por la misma.

Para la aceptación de tramos terminados además de cumplir con los parámetros de diseño y densidad del 97% del peso volumétrico compacto obtenido en laboratorio, se deberán efectuar pruebas de desempeño en la máquina de simulación de Hamburgo a especímenes extraídos directamente de campo, para garantizar que la mezcla colocada es resistente a las deformaciones permanentes y al daño por humedad conforme a la recomendación AMAAC RA 01/2008.

Si a juicio de la Dependencia es necesario remover los tramos defectuosos que no cumplan con los requerimientos establecidos en el protocolo de control de calidad AMAAC PA-MA 02 / 2008 de la carpeta, el Contratista deberá removerlas y reemplazarlas corriendo a cargo del Contratista los costos involucrados, hasta alcanzar los requerimientos marcados en esta especificación particular.

➤ *Medición.*

La construcción de la carpeta asfáltica con mezcla en caliente se contrate a precios unitarios por unidad de obra terminada y sea ejecutada conforme a lo indicado en esta especificación, a satisfacción de la dependencia, se medirá para efecto de pago, tomando como unidad el metro cúbico de carpeta terminada, con aproximación a un decimal.