



U. M. S. N. H.



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DE UN
PROTOTIPO PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A
LAS DEFORMACIONES PERMANENTES DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS. ANALIZANDO CRITERIOS DE DEFORMACIÓN
PERMANENTE EN EQUIPOS SIMILARES**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA
DEL TRANSPORTE EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

PRESENTA:

DELIA DEYANIRA CORTÉS BAUTISTA

ASESOR:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA



ÍNDICE

Agradecimientos

Resumen

Abstract

Abreviaturas

Lista de tablas

Lista de figuras

INTRODUCCIÓN 1

JUSTIFICACIÓN 7

OBJETIVOS 9

Capítulo 1

PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA CARRETERAS 11

1.1 Introducción 13



Índice

1.2	Descripción de los pavimentos asfálticos	15
1.2.1	Terracerías	15
1.2.2	Sub – Base	16
1.2.3	Base	16
1.2.4	Carpeta Asfáltica	16
1.3	Deterioros en pavimentos asfálticos	18
1.3.1	Desprendimientos	19
1.3.2	Agrietamientos	21
1.3.3	Ondulaciones	23
Capítulo 2		
MEZCLAS ASFÁLTICAS		25
2.1	Introducción	27
2.2	Asfaltos	29
2.2.1	Propiedades físicas	30
2.2.2	Clasificación de los asfaltos	32
2.2.3	Pruebas para determinar las propiedades del cemento asfáltico	45
2.3	Agregados Pétreos para Mezclas Asfálticas	48
2.3.1	Clasificación de las rocas	48
2.3.2	Clasificación de los pétreos	48
2.3.3	Propiedades de los agregados pétreos	49
2.3.4	Requisitos de calidad	51
2.3.5	Ensayos de caracterización de los agregados pétreos	52
2.4	Mezclas Asfálticas	54
2.4.1	Clasificación de las mezclas	55
2.4.2	Parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas	57
2.5	Diseño de Mezclas Asfálticas	60



Índice

2.5.1	Diseño Marshall	62
2.5.2	Diseño SUPERPAVE	66

Capítulo 3

DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	69	
3.1	Introducción	71
3.2	Deformaciones permanentes	72
3.3	Factores que influyen en las deformaciones permanentes	80
3.3.1	Granulometría y características del material pétreo	80
3.3.2	Contenido de vacíos	80
3.3.3	Tipo y contenido de ligante asfáltico	81
3.3.4	Cargas del tráfico	82
3.3.5	Geometría de la carretera	83
3.3.6	Temperatura de servicio	82
3.3.7	Control de calidad durante la construcción	83
3.4	Métodos para la determinación de las deformaciones permanentes	84
3.4.1	Equipos de campo	84
3.4.2	Ensayos de laboratorio	86
3.5	Tramos con deformaciones permanentes en el Estado de Michoacán	98
3.5.1	Tramos a cargo de la SCT	98
3.5.2	Tramos a cargo de la Junta de Caminos del Estado	99
3.6	Investigaciones realizadas en distintos países	100
3.6.1	Chile	100
3.6.2	Colombia	101
3.6.3	España – México	102
3.6.4	Francia	103
3.6.5	México	103



Índice

Capítulo 4

**DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO
UMICH” 105**

4.1 Introducción 107

4.2 Diseño del Prototipo 109

4.2.1 Descripción de prototipo 109

4.2.2 Descripción del procedimiento de prueba 113

4.3 Componentes del prototipo 117

4.3.1 Dispositivo de alimentación de aire 119

4.3.2 Unidad de control 120

4.3.3 Unidad de mantenimiento 121

4.3.4 Control de encendido/apagado de la máquina y control de temperatura 124

4.3.5 Electroválvulas e instalación eléctrica 139

4.3.6 Velocidad del desplazamiento 144

4.3.7 Carro de desplazamiento 145

4.3.8 Cámara termostática 150

4.4 Puesta apunto del prototipo 151

Capítulo 5

ENSAYOS DE LABORATORIO 153

5.1 Introducción 155

5.2 Caracterización de los materiales 157

5.2.1 Pétreos 157

5.2.2 Asfalto 160

5.3 Diseño de la Mezcla 161



Índice

5.4	Elaboración de las probetas	163
5.4.1	Proceso de fabricación	163
5.4.2	Proceso de mezclado	165
5.4.3	Proceso de compactación	166
5.4.4	Gravedad específica de la mezclas asfáltica compactada (Gmb)	169
5.5	Ensayos de laboratorio	175
5.5.1	Preparación de las probetas antes de ser ensayadas	176
5.5.2	Ensayos realizados el Prototipo “Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH”	177
5.5.3	Ensayos realizados en el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA”	214
5.5.4	Ensayos realizados en la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”	264
Capítulo 6		
ANÁLISIS DE RESULTADOS		287
6.1	Introducción	289
6.2	Prototipo “Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH”	290
6.3	Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA”	298
6.4	Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”	308
6.5	Comparación de los ensayos	314
CONCLUSIONES		323
RECOMENDACIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN		329
	Recomendaciones para mejorar el equipo	329
	Recomendaciones sobre la normativa mexicana	329



Índice

Recomendaciones sobre los equipos a utilizar	330
Futuras líneas de investigación	331
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	332
ANEXOS	341
NLT-173/00. “Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio”	342
AASHTO TP 63 – 07. “Standard Method of Test for Determining Rutting Susceptibility of Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA)”	352
AASHTO TP 324 – 04. “Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted. Hot-Mix Asphalt (HMA)”	365
Planos del Prototipo “Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH”	372



Agradecimientos

AGRADECIMIENTOS

A Dios... por permitirme existir... por todo lo que he vivido y aprendido a lo largo de mi vida... por darme la fortaleza para seguir adelante día con día.

A mis Padres... porque gracias a su educación he logrado todo lo que soy y lo que tengo.

A mis hermanos Limbert y Jorge... por ser una parte trascendente en mi vida... mi ejemplo.

Familia Valle Bautista por todo lo que me han dado en el transcurso de mi vida...

A David... por todo tu apoyo... por esa luz que le diste a mi vida... por permitirme conocer el amor y poder haberlo vivido junto tí en total plenitud... por llevarme a volar con tus alas y poder conocer un mundo maravilloso... por todo lo que crecí junto a ti... siempre estarás en mi mente y en mi corazón... Gracias por existir Jucheti Mintzita.

A Claudia, por compartir este sueño juntas, por lograr concluirlo... por ser la hermana que nunca tuve... simplemente por existir.

Al Dr. Jorge Alarcón Ibarra, por creer en mí... por todo su apoyo en el transcurso de 7 años, por todas las cosas que me ha enseñado... por escucharme... por sus consejos...



Agradecimientos

Al Dr. Mauricio, por sus enseñanzas y aportaciones en la realización de este trabajo.

A la empresa SURFAX S.A. de C.V., así como a su personal, especialmente al Ing. Ignacio Cremades, por proporcionar los asfaltos para la elaboración de las probetas, así como la realización de los ensayos en la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”, por todas las facilidades brindadas para la realización de la Tesis. Al Ing. Pedro Limón, Ing. Omar, Ing. Israel Sandoval.

Al Instituto Mexicano del Transporte, en especial al Dr. Paul Garnica Anguas, Ing. Giovanni Rodríguez y a todo el personal del laboratorio de Infraestructura por las facilidades prestadas para la realización de los Ensayos en el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA”.

A la empresa SEM MAterials Puebla por la realización de los ensayos en la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”. Especialmente al Ing. Juan Pablo Valadez, Ing. Rosita

Al Laboratorio de materiales “Luis Silva Ruelas” especialmente a los Técnicos Chora y don Rube por todo el apoyo y las facilidades prestadas para la realización de la Tesis

A la empresa Triturados, Acarreos y Concretos S.A. de C.V., por proporcionarme el material pétreo para la realización de los ensayos.

A mis profesores de la Maestría, especialmente al M.I. Julio Chávez, M.I. Jaime Saavedra, Dr. Carlos Chávez, Dr. Hugo Hernández.

Compañeros de la Maestría, Esteban Brito, Selene Citlallin Pérez, porque de cada uno de ellos logre aprender algo.

A Fabián † ... Por todo lo que pude aprender de ti y por siempre creer en mí, por seguir viviendo en mí.

A la Familia Navarro Bautista, especialmente a mi tía Beronica, por todos sus sabios consejos, por apoyarme.



Agradecimientos

A Edith González, por se una amiga como pocas, por permitirme entrar en tu mundo...

A mis amigas, por formar parte de mi vida... especialmente Lorena Casillas, Naivi Cortés Quiáhuitl Martínez, Edith Venegas, Connie Trejo, Morelia Ahumada, Guadalupe Arredondo, Dennys Aledo, Yunuén Vásquez.

A los Tesistas de Licenciatura Chava, José, Mario, Noé, Panchin, por su ayuda en la realización de los ensayos.

Y acada una de las personas que ha contribuido directa o indirectamente en la realización de este trabajo....

Gracias totales!!!



RESUMEN

Los pavimentos para carreteras tienen una importancia fundamental en el desarrollo económico y social de cualquier país, debido a la gran cantidad de pasajeros y mercancías que se desplazan diariamente por ellos.

Actualmente, la mayor parte de los pavimentos que se construyen en el mundo son flexibles, lo cual significa que utilizan una mezcla asfáltica como capa de rodadura, México no es la excepción, por lo tanto, las mezclas asfálticas que se utilizan tienen una responsabilidad muy grande en su comportamiento.

En México, como en la mayoría de los países, las deformaciones permanentes y el daño inducido por la humedad en las mezclas asfálticas, son unas de las causas más comunes de fallas en los pavimentos, en su formación influyen factores como la granulometría, forma, tamaño, limpieza, dureza, etc. esto en lo que se refiere a los agregados pétreos; si hablamos del ligante asfáltico, podemos mencionar otros más como la cantidad y tipo de asfalto; así como características propias de la mezcla como son los vacíos en el agregado mineral y vacíos en la mezcla, entre otras.



Resumen

En los últimos años, se han desarrollado una gran cantidad de pruebas de laboratorio para predecir y determinar las causas de los deterioros en las mezclas asfálticas, que van desde ensayos diametrales, uniaxiales, triaxiales, de corte, empíricos y de simulación.

Los ensayos de simulación, reproducen los efectos del tráfico que pasa por encima de la mezcla, y existen una variedad de modalidades; entre los que se puede mencionar el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA”, la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”, Pista de Ensayo de Laboratorio y otros más con características similares.

Debido a la falta de recursos económicos para adquirir tecnología, por parte de Investigadores de la UMSNH surge el interés y la necesidad por desarrollar un equipo que permita medir la deformación permanente en mezclas asfálticas

Utilizando los equipos de simulación que se tienen actualmente en México, se realizaron una serie de pruebas con el objeto de evaluar el comportamiento que ofrecen las mezclas asfálticas densas usadas en México fabricadas con asfaltos modificados y convencionales.

Aunque en otros países cuentan con una normativa acerca de las deformaciones permanentes en mezcla asfáltica, en México no se cuenta con ningún método de ensayo definido para evaluar este factor, así como la deformación máxima y del equipo con el que debe realizarse este ensayo.



Abstract

ABSTRACT

The pavements for highways are of fundamental importance in the economic and social development of any country, due to the large number of passengers and goods moving day for them.

Currently, most of the pavements constructed in the world are flexible, which means that use asphalt as a wearing course, Mexico is no exception, therefore, asphalt mixtures that are used have a lot of responsibility great in his behavior.

In Mexico, as in most countries, permanent deformation and moisture-induced damage in asphalt mixtures, are among the most common causes of pavement failures in the composition factors as particle size, shape, size, cleanliness, hardness, etc. this in regard to the stone aggregates, if we speak of the asphalt binder, we can mention others such as the amount and type of asphalt and mixing characteristics such as voids in mineral aggregate and voids in the mixture, among others.

In recent years, have developed a large number of laboratory tests to predict and determine the causes of the deterioration in asphalt mixtures, from diametral tests, uniaxial, triaxial, shear, empirical and simulation.



Resumen

The simulation tests, reproduce the effects of traffic passing over the mixture, and there are a variety of ways, among which one can mention the Asphalt Pavement Analyzer "APA" Hamburg Wheel Tracking Device "HWTD", Laboratory test track and others with similar characteristics.

Due to lack of financial resources to acquire technology, by researchers at the UMSNH interest arises and the need to develop a team to measure the permanent deformation in asphalt mixtures.

Using simulation teams are currently in Mexico, there were a series of tests in order to evaluate the performance offered by the dense asphalt mixtures used in Mexico made of modified and conventional asphalt.

Although other countries have rules about the asphalt mix permanent deformation in Mexico is not much with any test method in order to evaluate this factor, and the maximum deflection and equipment with which this test should be performed.



Abreviaturas

ABREVIATURAS

AAMAS	Asphalt-Aggregate Mixture Analysis System. "Sistema de Análisis de Mezclas Asfálticas"
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials. "Asociación Americana del Estado de Carreteras y Transportes"
APA	Asphalt Pavement Analyzer. "Analizador de Pavimentos Asfálticos"
ASOPAC	"Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia"
ASTM	American Society for Testing Materials. "Sociedad Americana de pruebas de Materiales"
CDOT	The Colorado Department of Transportation. "Departamento de Transporte de Colorado"
CILA	"Congreso Iberoamericano del Asfalto"
FHWA	Federal Highway Administration. "Administración Federal de Carreteras"



Abreviaturas

HMA	Hot-Mix Asphalt. "Mezcla Asfáltica en Caliente"
HWTD	Hamburg Wheel Tracking Device. "Rueda Cargada de Hamburgo"
IMT	"Instituto Mexicano del Transporte"
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. "Laboratorio Central de Puentes y Carreteras "
LVDT	Linear Variable Differential Transformers.
NAT	Nottingham Asphalt Tester. "Probador de Asfalto de Nottingham"
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program.
PG	Performance Grade, "Grado de Desempeño"
SCT	"Secretaría de Comunicaciones y Transportes"
SGC	Superpave, Gyrotory Compactor, "Compactador Giratorio Superpave"
SHRP	Strategic Highway Research Program, "Programa Estratégico de Investigación de Carreteras"
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement, "Pavimentos Asfálticos de Comportamiento Superior"
UMSNH	"Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo"
VAM	"Vacíos del Agregado Mineral"



Lista de Tablas

Lista de Tablas

Introducción

TABLA I.1	LONGITUD DE LA RED FEDERAL PAVIMENTADA	1
TABLA I.2	LONGITUD DE LA RED FEDERAL EN EL ESTADO DE MICHOACÁN (DICIEMBRE DE 2008)	2

Capítulo 2

MEZCLAS ASFÁLTICAS

TABLA 2.2.1	CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS SEGÚN SU VISCOSIDAD DINÁMICA A 60°C	32
TABLA 2.2.2	REQUISITOS DE CALIDAD PARA CEMENTO ASFÁLTICO CLASIFICADO POR SU VISCOSIDAD DINÁMICA A 60°C	34
TABLA 2.2.3	CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS QUE SE UTILIZAN PARA LA MODIFICACIÓN DE ASFALTOS	37
TABLA 2.2.4	REQUISITOS DE CALIDAD PARA CEMENTO ASFÁLTICOS MODIFICADOS AC-5 Y AC-20	41
TABLA 2.2.5	AJUSTES DEL GRADO PG SELECCIONADO POR CLIMA, DE ACUERDO CON LA INTENSIDAD DEL TRÁNSITO ESPERADO Y CON LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN	43
TABLA 2.2.6	REQUISITOS DE CALIDAD PARA CEMENTO ASFÁLTICOS GRADO PG	44
TABLA 2.3.1	REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa (PARA CUALQUIER VALOR DE ΣL)	51



Lista de Tablas

TABLA 2.3.2	REQUISITOS DE CALIDAD DEL MATERIAL PÉTREO PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa (PARA CUALQUIER VALOR DE ΣL)	52
TABLA 2.5.1	PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	61
TABLA 2.5.2	REQUISITOS DE CALIDAD PARA MEZCLAS DE GRANULOMETRÍA Densa, DISEÑADAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL	64
TABLA 2.5.3	VACÍOS DEL AGREGADO MINERAL (VAM) PARA MEZCLAS DE GRANULOMETRÍA Densa, DISEÑADAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL	65
TABLA 2.5.4	ENSAYOS SUPERPAVE DE DESEMPEÑO PARA LOS NIVELES INTERMEDIO Y AVANZADO	68

Capítulo 3

DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

TABLA 3.4.1	EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS ENSAYOS DIAMETRALES PARA EVALUAR LA SUCEPTIBILIDAD DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	87
TABLA 3.4.2	EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS ENSAYOS UNIAXIALES PARA EVALUAR LA SUCEPTIBILIDAD DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	88
TABLA 3.4.3	EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS ENSAYOS TRIAXIALES PARA EVALUAR LA SUCEPTIBILIDAD DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	89
TABLA 3.4.4	EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS ENSAYOS DE SIMULACIÓN PARA EVALUAR LA SUCEPTIBILIDAD DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	90
TABLA 3.5.1	TRAMOS CON DEFORMACIONES PERMANENTES EN EL ESTADO DE MICHOACÁN A CARGO DE LA SCT	98
TABLA 3.5.2	TRAMOS CON DEFORMACIONES PERMANENTES EN EL ESTADO DE MICHOACÁN A CARGO DE LA JUNTA DE CAMINOS DEL ESTADO	99

Capítulo 4

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

TABLA 4.2.1	PRECISIÓN PARA LAS VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN (mm/hr) EN MEZCLAS DE LABORATORIO Y PAVIMENTO	116
-------------	---	-----



Lista de Tablas

Capítulo 5

ENSAYOS DE LABORATORIO

TABLA 5.1.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA ANALIZAR LA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	156
TABLA 5.2.1	CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PÉTREO UTILIZADO EN LOS ENSAYOS	158
TABLA 5.2.2	AJUSTE GRANULOMÉTRICO DEL MATERIAL PÉTREO UTILIZADO EN LOS ENSAYOS	159
TABLA 5.2.3	ASFALTOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES	160
TABLA 5.2.4	RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA POR EL MÉTODO SUPERPAVE	160
TABLA 5.3.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS FABRICADAS PARA ENCONTRAR EL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO	161
TABLA 5.4.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS FABRICADAS	163
TABLA 5.4.2	FRACCIONES Y PORCENTAJES DEL MATERIAL PÉTREO EMPLEADO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA	163
TABLA 5.4.3	TEMPERATURAS DE MEZCLADO Y DE COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS FABRICADAS	166
TABLA 5.4.4	NÚMERO TOTAL DE PROBETAS FABRICADAS PARA LOS DISTINTOS ENSAYOS	169
TABLA 5.4.5	DENSIDADES DE LAS PROBETAS DE 6", ELABORADAS CON AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO	170
TABLA 5.4.6	DENSIDADES DE LAS PROBETAS DE 4", ELABORADAS CON AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO	171
TABLA 5.4.7	CLASIFICACIÓN DE LAS PROBETAS DE 6" DE ACUERDO AL PORCENTAJE DE VACÍOS Y AL EQUIPO UTILIZADO	172
TABLA 5.4.8	CLASIFICACIÓN DE LAS PROBETAS DE 4" DE ACUERDO AL PORCENTAJE DE VACÍOS Y AL EQUIPO UTILIZADO	174
TABLA 5.5.1	CARACTERÍSTICAS A LAS QUE SE SOMETIERON LAS PROBETAS EN CADA UNO DE LOS ENSAYOS	175
TABLA 5.5.2	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 1 Y 2 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	181
TABLA 5.5.3	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 3 Y 4 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	183
TABLA 5.5.4	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 5 Y 6 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	185



Lista de Tablas

TABLA 5.5.5	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 7 Y 8 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	189
TABLA 5.5.6	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 9 Y 10 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	191
TABLA 5.5.7	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 11 Y 12 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	193
TABLA 5.5.8	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 13 Y 14 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	197
TABLA 5.5.9	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 15 Y 16 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	199
TABLA 5.5.10	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 17 Y 18 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	201
TABLA 5.5.11	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 19 Y 20 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	205
TABLA 5.5.12	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 21 Y 22 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	207
TABLA 5.5.13	RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 23 Y 24 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	209
TABLA 5.5.14	PARÁMETROS UTILIZADOS EN LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS EN EL APA	217
TABLA 5.5.15	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 1, PROBETAS 2 Y 3 DE 6" ELABORADAS CON EL 6% DE AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	220
TABLA 5.5.16	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 1, PROBETAS 6 Y 8 DE 6" ELABORADAS CON EL 7% DE AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	222
TABLA 5.5.17	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 1, PROBETAS 10 Y 12 DE 6" ELABORADAS CON EL 8% DE AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	223
TABLA 5.5.18	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 2, PROBETAS 1 Y 2 DE 6" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	227
TABLA 5.5.19	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 2, PROBETAS 5 Y 6 DE 4" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	229
TABLA 5.5.20	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 2, PROBETAS 10 Y 13 DE 6" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	230
TABLA 5.5.21	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 3, PROBETAS 2 Y 5 DE 4" ELABORADAS CON EL 6% DE AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	234
TABLA 5.5.22	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 3, PROBETAS 17 Y 22 DE 4" ELABORADAS CON EL 7% DE AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	236



Lista de Tablas

TABLA 5.5.23	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 3, PROBETAS 30 Y 36 DE 4" ELABORADAS CON EL 8% DE AC -20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	237
TABLA 5.5.24	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 4, PROBETAS 4 Y 10 DE 4" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	241
TABLA 5.5.25	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 4, PROBETAS 13 Y 20 DE 4" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	243
TABLA 5.5.26	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 4, PROBETAS 27 Y 33 DE 4" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	244
TABLA 5.5.27	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 5, PROBETAS 9 Y 12 DE 4" ELABORADAS CON EL 6% DE AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	248
TABLA 5.5.28	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 5, PROBETAS 20 Y 24 DE 4" ELABORADAS CON EL 7% DE AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	250
TABLA 5.5.29	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 5, PROBETAS 28 Y 33 DE 4" ELABORADAS CON EL 8% DE AC -20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	252
TABLA 5.5.30	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 6, PROBETAS 1 Y 8 DE 4" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	256
TABLA 5.5.31	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 6, PROBETAS 22 Y 24 DE 4" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	258
TABLA 5.5.32	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 6, PROBETAS 30 Y 31 DE 4" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	260
TABLA 5.5.33	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 1. PROBETAS 2 Y 3 DE 6" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDAD CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX S.A. DE C.V.	270
TABLA 5.5.34	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 2. PROBETAS 1 Y 2 DE 6" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO, MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDAD CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SEM MATERIALS MÉXICO.	272
TABLA 5.5.35	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 3. PROBETAS 6 Y 8 DE 6" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDAD CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX S.A. DE C.V.	274
TABLA 5.5.36	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 4. PROBETAS 1 Y 2 DE 6" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDAD CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX S.A. DE C.V.	276
TABLA 5.5.37	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 5. PROBETAS 10 Y 12 DE 6" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDAD CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX S.A. DE C.V.	278



Lista de Tablas

TABLA 5.5.38	RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 7. PROBETA 13 DE 6” ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDAD CARGADA DE HAMBURGO “HWTD”. SURFAX S.A. DE C.V.	281
--------------	--	-----



Lista de Figuras

Lista de Figuras

Introducción

FIGURA I.1	ESTADO FÍSICO DE LA RED DE CARRETERAS EN EL ESTADO DE MICHOACÁN	3
FIGURA I.2	RODERAS POR FALLAS EN LAS CAPAS GRANULARES	4
FIGURA I.3	RODERAS POR FALLAS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA	4

Capítulo 1

PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA CARRETERAS

FIGURA 1.2.1	SECCIÓN TRANSVERSAL EN BANCÓN DE UN PAVIMENTO ASFÁLTICO	15
FIGURA 1.2.2	DISTRIBUCIÓN DE LAS CARGAS EN UN PAVIMENTO FLEXIBLE	17
FIGURA 1.3.1	BACHE	19
FIGURA 1.3.2	DESPRENDIMIENTO DE LA CARPETA COMO CAPA	19
FIGURA 1.3.3	DESPRENDIMIENTO DEL MATERIAL PÉTREO DE LA CARPETA ASFÁLTICA	20
FIGURA 1.3.4	DESPRENDIMIENTO DE LA PELÍCULA DE ASFALTO	20
FIGURA 1.3.5	GRIETA LONGITUDINAL EN EL CENTRO	21
FIGURA 1.3.6	GRIETA TRANSVERSAL	21



Lista de Figuras

FIGURA 1.3.7	GRIETA EN FORMA DE MAPA	22
FIGURA 1.3.8	GRIETA EN FORMA PIEL DE COCODRILO	22
FIGURA 1.3.9	DESPLAZAMIENTO DE LA CARPETA ASFÁLTICA	23
FIGURA 1.3.10	ABULTAMIENTO	23
FIGURA 1.3.11	RODERA	24

Capítulo 2

MEZCLAS ASFÁLTICAS

FIGURA 2.2.1	COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ASFALTO	31
FIGURA 2.2.2	REGIONES GEOGRÁFICAS PARA LA UTILIZACIÓN DE ASFALTOS CLASIFICADOS SEGÚN SU VISCOSIDAD DINÁMICA A 60°C	33
FIGURA 2.2.3	DIAGRAMA DE UN PROTOTIPO DE PLANTA MODIFICADORA DE ASFALTO CON ELVALLOY®	39
FIGURA 2.2.4	COMPARACIÓN MICROSCÓPICA DE LA UNIÓN DEL ASFALTO CON POLÍMEROS	40
FIGURA 2.2.5	REGIONES GEOGRÁFICAS PARA LA UTILIZACIÓN RECOMENDABLE DE CEMENTOS ASFÁLTICOS GRADO PG	42
FIGURA 2.3.1	FORMAS DE LAS PARTÍCULAS DEL AGREGADO PÉTREO: 1. REDONDEADA, 2. IREGULAR, 3. ANGULAR 4. LAJA, 5. ALARGADA, 6. ALARGADA – LAJOSA.	50
FIGURA 2.4.1	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA	57
FIGURA 2.4.2	PARÁMETROS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO	58
FIGURA 2.5.1	PEDESTAL DE COMPACTACIÓN Y MÁQUINA DE ENSAYO MARSHALL	63

Capítulo 3

DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

FIGURA 3.2.1	DEFINICIÓN DE AHUELLAMIENTO TOTAL	72
FIGURA 3.2.2	CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE LA RODERA POR EL MÉTODO DEL ALAMBRE	74
FIGURA 3.2.3	CÁLCULO DE LAS RODERAS	74



Lista de Figuras

FIGURA 3.2.4	CARRETERA FEDERAL No. 35, CHAPALA – LA BARCA, KM 11+400	75
FIGURA 3.2.5	CARRETERA FEDERAL No. 35, CHAPALA – LA BARCA, KM 11+700	76
FIGURA 3.2.6	CARRILES LATERALES EN AMBOS SENTIDOS DE LA CALZADA JUÁREZ, EN LA CIUDAD DE MORELIA	77
FIGURA 3.2.7	DEFORMACIONES EN EL LIBRAMIENTO EN LA CIUDAD DE MORELIA (MERCADO DE ABASTOS)	77
FIGURA 3.2.8	DEFORMACIONES EN LA LATERAL DEL LIBRAMIENTO EN LA CIUDAD DE MORELIA (POLICIA Y TRÁNSITO)	78
FIGURA 3.2.9	DEFORMACIONES EN LA LATERAL DEL LIBRAMIENTO EN LA CIUDAD DE MORELIA (PLAZA LAS AMÉRICAS)	78
FIGURA 3.2.10	DEFORMACIONES EN EL CRUCERO DE LA SALIDA A QUIROGA EN LA CIUDAD DE MORELIA	78
FIGURA 3.4.1	EQUIPO VIDEO LÁSER RST ADVANCE	85
FIGURA 3.4.2	PERFILÓMETRO DYNATESTS MARK II	86
FIGURA 3.4.3	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO “HWTD”, DE LA EMPRESA SURFAX®	91
FIGURA 3.4.4	RUEDA CARGADA FRANCESA	92
FIGURA 3.4.5	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA”, DEL INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE	93
FIGURA 3.4.6	PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO	94
FIGURA 3.4.7	CARRUSEL DE FATIGA	96
FIGURA 3.4.8	PISTA DE ENSAYO DE PAVIMENTOS A ESCALA REAL DEL CEDEX	97

Capítulo 4

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

FIGURA 4.2.1	VISTA FRONTAL Y LATERAL DEL CARRETÓN MÓVIL	110
FIGURA 4.2.2	CÁMARA TERMOSTÁTICA	112
FIGURA 4.3.1	PRINCIPALES COMPONENTES DEL PROTOTIPO	118
FIGURA 4.3.2	COMPRESOR DE AIRE	119
FIGURA 4.3.3	GABINETE METÁLICO	120



Lista de Figuras

FIGURA 4.3.4	UNIDAD DE MANTENIMIENTO	121
FIGURA 4.3.5	VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN CON MANÓMETRO Y FILTRO	122
FIGURA 4.3.6	LUBRICADOR	122
FIGURA 4.3.7	VÁLVULA DE CIERRE DE ACCIONAMIENTO MANUAL	122
FIGURA 4.3.8	PIEZAS ESPECIALES UTILIZADAS EN LA UNIDAD DE MANTENIMIENTO	123
FIGURA 4.3.9	PANEL DE CONTROL	124
FIGURA 4.3.10	PARÁMETROS DEL CONTROL DE TEMPERATURA	125
FIGURA 4.3.11	ELECTROVÁLVULAS E INSTALACIÓN ELÉCTRICA	139
FIGURA 4.3.12	ELECTROVÁLVULA DE 3/2 VÍAS	140
FIGURA 4.3.13	ELECTROVÁLVULA DE 5/2 VÍAS	140
FIGURA 4.3.14	CONTACTOR	140
FIGURA 4.3.15	RELAY	142
FIGURA 4.3.16	DISYUNTOR	142
FIGURA 4.3.17	RACOR RÁPIDO ROSCADO EN L, GIRABLE 360°	143
FIGURA 4.3.18	CONECTOR PARA BOBINAS Y VÁLVULAS	143
FIGURA 4.3.19	SILENCIADOR 1	143
FIGURA 4.3.20	SILENCIADOR 2	143
FIGURA 4.3.21	VISTA FRONTAL Y LATERAL DEL CONTROL DE LA VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO	144
FIGURA 4.3.22	VÁLVULA DE ESTRANGULACIÓN Y ANTIRRETORNO	144
FIGURA 4.3.23	PARTES DEL CARRO DE DESPLAZAMIENTO	145
FIGURA 2.3.24	ACTUADOR LINEAL	146
FIGURA 2.3.25	PIES DE FIJACIÓN	146
FIGURA 4.3.26	DETECTORES DE POSICIÓN	147
FIGURA 4.3.27	MOLDE DE ACERO DE 300 X 300 mm	148
FIGURA 4.3.28	MOLDE DE NAYLAMID DE 4"	148
FIGURA 4.3.29	MOLDE DE NAYLAMID DE 6"	148



Lista de Figuras

FIGURA 4.3.30	INDICADOR DE CARÁTULA	149
FIGURA 4.3.31	CÁMARA TERMOSTÁTICA	150

Capítulo 5

ENSAYOS DE LABORATORIO

FIGURA 5.2.1	BANCO DE TRITURADOS, ACARREOS, CONCRETOS S.A. DE C.V. UBICADO EN EL KM 7.0 DE LA CARRETERA MORELIA – SALAMANCA	157
FIGURA 5.2.2	LÍMITES GRANULOMÉTRICOS PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA (PARA CUALQUIER VALOR DE ΣL Y LA CURVA GRANULOMÉTRICA UTILIZADA (T.M.A. $\frac{1}{2}$ "	159
FIGURA 5.3.1	PROBETAS FABRICADAS PARA ENCONTRAR EL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO	162
FIGURA 5.4.1	FRACCIONES EN LAS QUE SE SEPARÓ EL MATERIAL PÉTREO PARA LA ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE 4" Y 6"	164
FIGURA 5.4.2	FRACCIONES EN LAS QUE SE SEPARÓ EL MATERIAL PÉTREO PARA LA ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE 4" Y 6"	164
FIGURA 5.4.3	PROCESO DE MEZCLADO	165
FIGURA 5.4.4	PANTALLA DEL COMPACTADOR GIRATORIO	167
FIGURA 5.4.5	PROCESO DE COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	168
FIGURA 5.4.6	CÁLCULO DE LAS DENSIDADES DE LAS PROBETAS	170
FIGURA 5.5.1	PROCESO DE CORTE DE LAS PROBETAS	176
FIGURA 5.5.2	PROCEDIMIENTO EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	179
FIGURA 5.5.3	ENSAYOS 1 Y 2 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	181
FIGURA 5.5.4	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 1 Y 2 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	182
FIGURA 5.5.5	ENSAYOS 3 Y 4 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	184
FIGURA 5.5.6	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 3 Y 4 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	184
FIGURA 5.5.7	ENSAYOS 5 Y 6 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	186
FIGURA 5.5.8	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 5 Y 6 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	186



Lista de Figuras

FIGURA 5.5.9	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH” PARA LOS ENSAYOS 1, 2, 3, 4, 5 Y 6 DE 4”. FABRICADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA	187
FIGURA 5.5.10	VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120. EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”, PARA LOS ENSAYOS 1, 2, 3, 4, 5 Y 6. DE LAS PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA	188
FIGURA 5.5.11	ENSAYOS 7 Y 8 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	190
FIGURA 5.5.12	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 7 Y 8 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	190
FIGURA 5.5.13	ENSAYOS 9 Y 10 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	192
FIGURA 5.5.14	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 9 Y 10 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	192
FIGURA 5.5.15	ENSAYOS 11 Y 12 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	194
FIGURA 5.5.16	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 11 Y 12 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	194
FIGURA 5.5.17	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH” PARA LOS ENSAYOS 7, 8, 9, 10, 11 Y 12 DE 4”. FABRICADAS CON ASFALTO MODIFICADO	195
FIGURA 5.5.18	VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120. EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”, PARA LOS ENSAYOS 7, 8, 9, 10, 11 Y 12. DE LAS PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO MODIFICADO	196
FIGURA 5.5.19	ENSAYOS 13 Y 14 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	198
FIGURA 5.5.20	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 13 Y 14 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	198
FIGURA 5.5.21	ENSAYOS 15 Y 16 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	200
FIGURA 5.4.22	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 15 Y 16 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	200
FIGURA 5.5.23	ENSAYOS 17 Y 18 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	202
FIGURA 5.5.24	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 17 Y 18 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	202
FIGURA 5.5.25	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”. PARA LOS ENSAYOS 13, 14, 15, 16, 17 Y 18 DE 6”. FABRICADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA	203
FIGURA 5.5.26	VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120. EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”, PARA LOS ENSAYOS 13, 14, 15, 16, 17 Y 18. DE LAS PROBETAS ELABORADAS CON AC-20 DE SALAMANCA	204



Lista de Figuras

FIGURA 5.5.27	ENSAYOS 19 Y 20 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	206
FIGURA 5.5.28	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 19 Y 20 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	206
FIGURA 5.5.29	ENSAYOS 21 Y 22 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	208
FIGURA 5.4.30	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 21 Y 22 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	208
FIGURA 5.5.31	ENSAYOS 23 Y 24 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	210
FIGURA 5.5.32	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 23 Y 24 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	210
FIGURA 5.5.33	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”. PARA LOS ENSAYOS 19, 20, 21, 22, 23 y 24 DE 6”. FABRICADAS CON ASFALTO MODIFICADO	211
FIGURA 5.5.34	VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”, PARA LOS ENSAYOS 19, 20, 21, 22, 23 Y 24. DE LAS PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO MODIFICADO	212
FIGURA 5.5.35	FUNCIONAMIENTO SIMPLIFICADO DEL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA”	216
FIGURA 5.5.36	PANEL PRINCIPAL DE CONTROL DEL APA	217
FIGURA 5.5.37	PARÁMETROS DEL PANEL DE CONTROL DEL APA	218
FIGURA 5.5.38	CALIBRACIÓN DE LAS RUEDAS	218
FIGURA 5.5.39	PRECALENTAMIENTO DE LAS PROBETAS	218
FIGURA 5.5.40	CALZADO DE LAS PROBETAS	218
FIGURA 5.5.41	COLOCACIÓN DE LAS PROBETAS DENTRO DEL APA	219
FIGURA 5.5.42	ENSAYO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN EL APA	219
FIGURA 5.5.43	PROBETAS DESPUÉS DE SER ENSAYADAS	219
FIGURA 5.5.44	ENSAYO 1, PROBETAS 2 Y 3. DE 6”. ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	221
FIGURA 5.5.45	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 1. PROBETAS 2 Y 3, DE 6” ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	221
FIGURA 5.5.46	ENSAYO 1, PROBETAS 6 Y 8. DE 6”. ELABORADAS CON EL 7% DE AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	222
FIGURA 5.5.47	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 1. PROBETAS 6 Y 8, DE 6” ELABORADAS CON EL 7% DE AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	223



Lista de Figuras

FIGURA 5.5.48	ENSAYO 1, PROBETAS 10 Y 12. DE 6". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	224
FIGURA 5.5.49	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 1. PROBETAS 10 Y 12, DE 6" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	225
FIGURA 5.5.50	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 1. PROBETAS 2, 3, 6, 8, 10 Y 12, DE 6" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	226
FIGURA 5.5.51	GRÁFICA DEFORMACIÓN TOTAL DEL ENSAYO 1. PROBETAS 2, 3, 6, 8, 10 Y 12, DE 6" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	227
FIGURA 5.5.52	ENSAYO 2, PROBETAS 1 Y 2. DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	228
FIGURA 5.5.53	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 2. PROBETAS 1 Y 2, DE 6" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	228
FIGURA 5.5.54	ENSAYO 2, PROBETAS 5 Y 6. DE 6". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	229
FIGURA 5.5.55	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 2. PROBETAS 1 Y 2, DE 6" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	230
FIGURA 5.5.56	ENSAYO 2, PROBETAS 10 Y 13. DE 6". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	231
FIGURA 5.5.57	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 2. PROBETAS 10 Y 13, DE 6" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	231
FIGURA 5.5.58	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 2. PROBETAS 2, 2, 5, 6, 8, 10 Y 13, DE 6" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	232
FIGURA 5.5.59	GRÁFICA DEFORMACIÓN TOTAL DEL ENSAYO 2. PROBETAS 1, 2, 5, 6, 8, 10 Y 13, DE 6" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	233
FIGURA 5.5.60	ENSAYO 3, PROBETAS 2 Y 5. DE 4". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	235
FIGURA 5.5.61	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 3. PROBETAS 2 Y 5, DE 4" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	235
FIGURA 5.5.62	ENSAYO 3, PROBETAS 17 Y 22. DE 4". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	236
FIGURA 5.5.63	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 3. PROBETAS 17 Y 22, DE 4" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	237
FIGURA 5.5.64	ENSAYO 3, PROBETAS 30 Y 36. DE 4". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	238



Lista de Figuras

FIGURA 5.5.65	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 3. PROBETAS 30 Y 36, DE 4" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	238
FIGURA 5.5.66	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 3. PROBETAS 2, 5, 17, 22, 30 Y 36, DE 4" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	239
FIGURA 5.5.67	GRÁFICA DEFORMACIÓN TOTAL DEL ENSAYO 3. PROBETAS 2, 5, 17, 22, 30 Y 36. DE 4" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA	240
FIGURA 5.5.68	ENSAYO 4, PROBETAS 4 Y 10. DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	242
FIGURA 5.5.69	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 4. PROBETAS 4 Y 10, DE 4" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	242
FIGURA 5.5.70	ENSAYO 4, PROBETAS 13 Y 20. DE 4". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	243
FIGURA 5.5.71	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 4. PROBETAS 13 Y 20, DE 4" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	244
FIGURA 5.5.72	ENSAYO 4, PROBETAS 27 Y 33. DE 4". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	245
FIGURA 5.5.73	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 4. PROBETAS 27 Y 33, DE 4" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	245
FIGURA 5.5.74	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 4. PROBETAS 4, 10, 13, 20, 27, Y 33, DE 4" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	246
FIGURA 5.5.75	GRÁFICA DEFORMACIÓN TOTAL DEL ENSAYO 4. PROBETAS 4, 10, 13, 20, 27 Y 33, DE 4". ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA	247
FIGURA 5.5.76	ENSAYO 5, PROBETAS 9 Y 12. DE 4". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	249
FIGURA 5.5.77	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 5. PROBETAS 9 Y 12, DE 4" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	249
FIGURA 5.5.78	ENSAYO 5, PROBETAS 20 Y 24. DE 4". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	251
FIGURA 5.5.79	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 5. PROBETAS 20 Y 24, DE 4" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	251
FIGURA 5.5.80	ENSAYO 5, PROBETAS 28 Y 33. DE 4". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	253



Lista de Figuras

FIGURA 5.5.81	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 5. PROBETAS 28 Y 33, DE 4" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	253
FIGURA 5.5.82	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 5. PROBETAS 9, 12, 20, 24, 28, Y 33, DE 4" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	254
FIGURA 5.5.83	GRÁFICA DEFORMACIÓN TOTAL DEL ENSAYO 5. PROBETAS 9, 12, 20, 24, 28 Y 33, DE 4" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	255
FIGURA 5.5.84	ENSAYO 6, PROBETAS 1 Y 8. DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	257
FIGURA 5.5.85	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 6. PROBETAS 1 Y 8, DE 4" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS INMERSIÓN EN EL APA	257
FIGURA 5.5.86	ENSAYO 6, PROBETAS 22 Y 24. DE 4". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	259
FIGURA 5.5.87	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 6. PROBETAS 22 Y 24, DE 4" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	259
FIGURA 5.5.88	ENSAYO 6, PROBETAS 30 Y 31. DE 4". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	261
FIGURA 5.5.89	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 6. PROBETAS 30 Y 31, DE 4" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS INMERSIÓN EN EL APA	261
FIGURA 5.5.90	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 6. PROBETAS 1, 8, 22, 24, 30 y 31 DE 4" ELABORADAS CON ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	262
FIGURA 5.5.91	GRÁFICA DEFORMACIÓN TOTAL DEL ENSAYO 6. PROBETAS 1, 8, 22, 24, 30 Y 31, DE 4" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA	263
FIGURA 5.5.92	PARÁMETROS ESTABLECIDOS PARA LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	267
FIGURA 5.5.93	GRÁFICA DE DEFORMACIÓN – NÚMERO DE CICLOS QUE SE REGISTRA DURANTE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	267
FIGURA 5.5.94	PROCEDIMIENTO EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD", DE SURFAX S.A. DE C.V.	268
FIGURA 5.5.95	ENSAYO 1, PROBETAS 1 Y 2. DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SURFAX S.A. DE C.V"	270



Lista de Figuras

FIGURA 5.5.96	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 1. PROBETAS 2 Y 3, DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SURFAX S.A. DE C.V"	271
FIGURA 5.5.97	ENSAYO 2, PROBETAS 1 Y 2. DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SEM MATERIALS MÉXICO"	273
FIGURA 5.5.98	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 2. PROBETAS 1 Y 2, DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	273
FIGURA 5.5.99	ENSAYO 3, PROBETAS 6 Y 8. DE 6". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SURFAX S.A. DE C.V"	275
FIGURA 5.5.100	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 3. PROBETAS 6 Y 8, DE 6". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	275
FIGURA 5.5.101	ENSAYO 4, PROBETAS 5 Y 6. DE 6". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SURFAX S.A. DE C.V"	277
FIGURA 5.5.102	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 2. PROBETAS 5 Y 6, DE 6". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	277
FIGURA 5.5.103	ENSAYO 5, PROBETAS 10 Y 12. DE 6". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SEM MATERIALS MÉXICO"	278
FIGURA 5.5.104	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 5. PROBETAS 10 Y 12, DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	279
FIGURA 5.5.105	ENSAYO 5, PROBETAS 10 Y 13. DE 6". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SURFAX S.A. DE C.V."	280
FIGURA 5.5.106	ENSAYO 5, PROBETAS 10 Y 13. DE 6". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SURFAX S.A. DE C.V."	282
FIGURA 5.5.107	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 7. PROBETA 13, DE 6". ELABORADA CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	282
FIGURA 5.5.108	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LAS PROBETAS 2, 3, 6, 8,10 Y 12. ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	283
FIGURA 5.5.109	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LAS PROBETAS 1, 2, 5, 6 Y 13. ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	284



Lista de Figuras

FIGURA 5.5.110	DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 6" A LOS DISTINTOS NÚMEROS DE CICLOS. PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO	285
----------------	---	-----

Capítulo 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

FIGURA 6.2.1	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE 4". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	290
FIGURA 6.2.2	VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120 PARA LOS ENSAYOS DE 4". PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	291
FIGURA 6.2.3	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	292
FIGURA 6.2.4	VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120 PARA LOS ENSAYOS DE 6". PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	293
FIGURA 6.2.5	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE 4 y 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	294
FIGURA 6.2.6	VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120. PARA LOS ENSAYOS DE 4" y 6". PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	295
FIGURA 6.2.7	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE 4 y 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	296
FIGURA 6.2.8	VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120. PARA LOS ENSAYOS DE 4" y 6". PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	297
FIGURA 6.3.1	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS CON LAS PROBETAS DE 4". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN SECO EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".	298
FIGURA 6.3.2	DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 4". ENSAYADAS EN SECO PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN SECO EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".	299



Lista de Figuras

FIGURA 6.3.3	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS CON LAS PROBETAS DE 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN SECO EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".	300
FIGURA 6.3.4	DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 6". ENSAYADAS EN SECO PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN SECO EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".	301
FIGURA 6.3.5	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS CON LAS PROBETAS DE 4". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS SATURADAS EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".	302
FIGURA 6.3.6	DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 4". ENSAYADAS EN SATURADO, PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS SATURADAS EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".	303
FIGURA 6.3.7	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYO CON LAS PROBETAS DE 4" y 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN SECO Y SATURADAS EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".	304
FIGURA 6.3.8	DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 4" Y 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN SECO Y SATURADAS EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".	305
FIGURA 6.3.9	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS CON LAS PROBETAS DE 4" y 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN SECO Y SATURADAS EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".	306
FIGURA 6.3.10	DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 4" Y 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN SECO Y SATURADAS EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".	307
FIGURA 6.4.1	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE 6" A LOS DISTINTOS NÚMEROS DE CICLOS. PROBETAS FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	308
FIGURA 6.4.2	PROMEDIOS DE DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 6" A LOS DISTINTOS NÚMEROS DE CICLOS. PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	309
FIGURA 6.4.3	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD" A LOS 4,778 CICLOS	310
FIGURA 6.4.4	PROMEDIOS DE DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 6" A LOS 4,778 DE CICLOS. PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO	311



Lista de Figuras

FIGURA 6.4.5	GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD" A LOS 2,000 CICLOS	312
FIGURA 6.4.6	PROMEDIOS DE DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 6" A LOS 2,000 DE CICLOS. PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO	313
FIGURA 6.5.1	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 4" FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO, ENSAYADAS A LOS 2,520 CICLOS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH", EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA" Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	315
FIGURA 6.5.2	DEFORMACIONES TOTALES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 4" FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO, ENSAYADAS A LOS 2,520 CICLOS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH", EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA" Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	316
FIGURA 6.5.3	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 6" FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO, ENSAYADAS A LOS 2,520 CICLOS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH", EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA" Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	317
FIGURA 6.5.4	DEFORMACIONES TOTALES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 6" FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO, ENSAYADAS A LOS 2,520 CICLOS EN LA EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH", EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA" Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	318
FIGURA 6.5.5	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 4" Y 6" FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA, ENSAYADAS A LOS 2,520 CICLOS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH", EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA" Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	319
FIGURA 6.5.6	DEFORMACIONES TOTALES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 4" Y 6" FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA, ENSAYADAS A LOS 2,520 CICLOS ENSAYADAS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH", EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA" Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	320
FIGURA 6.5.7	GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 4" Y 6" FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA, ENSAYADAS A LOS 2,520 CICLOS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH", EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA" Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	321
FIGURA 6.5.8	DEFORMACIONES TOTALES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 4" Y 6" FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO MODIFICADO, ENSAYADAS A LOS 2,520 CICLOS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH", EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA" Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"	322



Introducción

INTRODUCCIÓN

Desde el principio de la existencia del ser humano se ha observado su necesidad por comunicarse, por lo cual fue desarrollando diversos métodos para la construcción de caminos, desde los hechos a base de piedra y aglomerante hasta nuestra época con métodos perfeccionados basándose en la experiencia que conducen a grandes autopistas.

Gracias a un adecuado trazo, a la buena construcción y conservación de una red carretera es posible el crecimiento económico, cultural y social de un país; ya que, esto representa el movimiento de alimentos, consumos e insumos industriales y productos manufacturados indispensables para la vida, incluso el traslado de pasajeros.

De acuerdo a la Jurisdicción de las Residencias Generales de Conservación de la SCT (Diciembre de 2007), México cuenta con los siguientes kilómetros de Red Federal Pavimentada libre de peaje:

LINEAL				EQUIVALENTE			
CORREDOR	BÁSICA	SECUNDARIA	TOTAL	CORREDOR	BÁSICA	SECUNDARIA	TOTAL
9,900.64	13,551.60	17,168.93	40,630.17	13,361.31	14,324.60	17,735.89	45,439.80

TABLA I.1
LONGITUD DE LA RED FEDERAL PAVIMENTADA
FUENTE <WWW.SCT.GOB.MX>



Introducción

De la longitud total de la Red federal, el Estado Michoacán cuenta con un 5% de las carreteras federales, distribuidas de la siguiente forma:

LINEAL				EQUIVALENTE			
CORREDOR	BÁSICA	SECUNDARIA	TOTAL	CORREDOR	BÁSICA	SECUNDARIA	TOTAL
232.45	1,169.0	802.47	2,203.92	316.15	1,204.12	813.77	2,334.04

TABLA 1.2
LONGITUD DE LA RED FEDERAL EN EL ESTADO DE MICHOACÁN (DICIEMBRE DE 2008)
FUENTE <WWW.SCT.GOB.MX>

El nivel de servicio de nuestras carreteras disminuye rápidamente ya que han superado su vida útil debido a la falta de un adecuado programa de mantenimiento preventivo, así como al crecimiento acelerado en peso y volumen del tránsito de los vehículos que circulan por ellas, provocando con ello el desgaste de la carpeta asfáltica, el cual se refleja en la formación de roderas, fisuras en la superficie, desprendimiento de las partículas de agregado, entre otros deterioros.

Tanto en México como en el resto del mundo las carreteras son constantemente sometidas a grandes solicitaciones de tráfico, provocando con ello su deterioro prematuro. El hecho de que existan distintos tipos de deterioros en la superficie del pavimento hace que este no cumpla con las características para las cuales fue diseñado, lo cual influye directamente en la seguridad del usuario permitiendo que existan accidentes con mayor frecuencia.

La Dirección General de Conservación de Carreteras de la SCT, realizó el inventario de 2,241 km en el estado de Michoacán, de los cuales 435 km se encuentran en buen estado, 1,014 km se encuentra en estado satisfactorio y 792 km en estado no satisfactorio, esta información corresponde a Diciembre de 2008.

En la Figura 1.3 se puede observar el estado físico de la de la red de carreteras en el Estado de Michoacán.



Introducción



FIGURA I.1
ESTADO FÍSICO DE LA RED DE CARRETERAS EN EL ESTADO DE MICHOACÁN
FUENTE: <WWW.SCT.GOB.MX (DICIEMBRE, 2008)>

Como se puede observar, solo el 15% de las carreteras de Michoacán se encuentran en buenas condiciones, 55% en condiciones satisfactorias y el 30% en malas condiciones. El mal estado de nuestras carreteras repercute directamente en la seguridad de los usuarios; principalmente en el desgaste de los neumáticos, en la suspensión del vehículo y en el consumo de combustible.

Uno de los daños más importantes en las carreteras son las deformaciones permanentes, también conocidas como deformaciones plásticas, roderas o ahuellamiento, las cuales pueden ser de 3 tipos:



Introducción

- **Fallas en las capas granulares.** Causadas por un exceso de esfuerzos producido en las capas de Base o Sub-base, considerándose un fallo de la estructura del pavimento y no propiamente de los materiales. (Fig. I.2)
- **Fallas en la Mezcla Asfáltica.** Es el resultado de la falta de capacidad de la mezcla asfáltica para resistir las cargas inducidas por los vehículos pesados. (Fig. I.3)
- **Fallas por post-compactación de la Mezcla Asfáltica.** Causada por el exceso de compactación de la mezcla asfáltica.



FIGURA I.2

RODERAS POR FALLAS EN LAS CAPAS GRANULARES

FUENTE: <ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE: WWW.TFHRC.GOV>



FIGURA I.3

RODERAS POR FALLAS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

FUENTE: <ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE: WWW.TFHRC.GOV>



Introducción

Como se puede observar en las figuras I.2 y I.3, la diferencia entre estos 2 tipos de deformaciones radica en que cuando se deforma la mezcla asfáltica, parte de ella se eleva hacia ambos lados del surco, también conocido como arriñonamiento.

Para este estudio en particular, nos enfocaremos únicamente a la deformación que se produce en las mezclas asfálticas, las cuales son la acumulación de pequeñas deformaciones originadas por la aplicación de cargas verticales de los vehículos, la cual se observa como un surco longitudinal en el pavimento, justo bajos las huellas de los vehículos.

De acuerdo a distintas investigaciones realizadas para determinar la presencia de las deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas se ha concluido que la presencia de las roderas en la superficie de un pavimento se debe a una baja estabilidad en la mezcla asfáltica, la cual depende fundamentalmente de:

- Granulometría y características del material pétreo.
- El tipo y contenido del ligante asfáltico.
- Cargas del tráfico.
- Temperatura de servicio.
- Control de calidad durante su construcción.

Gran parte de las carreteras de México fueron construidas entre las décadas de los 50's y 70's cuando las solicitaciones de carga y tránsito eran mucho menores a las actuales; por consiguiente la normativa para su construcción era menos exigente en cuestión de espesores y calidad de materiales. El aumento del tránsito y de las cargas vehiculares ha hecho que se presente la deformación permanente en la mezcla asfáltica de las carreteras.

El promedio de vida de los pavimentos asfálticos ante las deformaciones plásticas que se ha obtenido a través de la experiencia en agencias de investigación de carreteras de los EE.UU. es de 11 años, donde se reporta que menos del 1% de los pavimentos falla durante el primer año de servicio, el 14% de los pavimentos, fallan antes de los 5 años y el 42% de los pavimentos, falla entre los 6 y 10 años. (Padilla Rodríguez, 2004). Esta situación no es aplicable en México ya que ocurre totalmente lo contrario y aunque se proyectan pavimentos



Introducción

para una vida de servicio de 15 ó 20 años, casi en su totalidad fallan en los primeros 5 años de vida.

Aunque esta deformación no influye inmediatamente en la capacidad de soporte del pavimento, puede acortar significativamente la vida efectiva, además de causar una pérdida en el nivel de servicio del camino.

Uno de los principales daños que tenemos en la Red Estatal son las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas, actualmente este tema se ha estudiado muy poco, es por ello que se decidió realizar un análisis completo del tema. Teniendo en cuenta que los equipos que existen en el mercado para evaluar este parámetro son costosos, en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo se vio la importancia de fabricar un equipo de simulación con el que se pudiera evaluar la resistencia a las deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas.

México cuenta con 3 distintos equipos de simulación: “Pista de Ensayo de Laboratorio, Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) y la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”, que si bien su finalidad es la misma, el análisis de las mezclas asfálticas es diferente, ya que las condiciones del ensayo varían en cada uno de ellos. Es por esto que se decidió analizar el comportamiento que tenía una mezcla con la misma granulometría, contenido asfáltico, elaboradas con asfalto virgen y modificado en los equipos que existen en el país, para poder observar si las mezclas asfálticas tenían un comportamiento que mantuviera la misma tendencia en los diferentes equipos.



Justificación

JUSTIFICACIÓN

La buena calidad de una mezcla asfáltica es de fundamental importancia en el diseño de la estructura de un pavimento, ya que es la parte que ve y puede sentir el usuario del vehículo que transita por una carretera.

Es necesario garantizar un desempeño adecuado de las mezclas asfálticas, sobre todo en lo que a deformaciones permanentes se refiere, ya que en la época de lluvias el agua que se acumula en la carretera representa un gran peligro para los usuarios que transitan por ella incrementando el número de accidentes.

Si las carreteras no se encuentran en buenas condiciones, se incrementan los costos de operación de los vehículos que transportan mercancías, lo cual se ve reflejado en el incremento del costo de los insumos.

En la actualidad existen varios equipos de simulación que nos permiten medir las deformaciones permanentes, sin embargo su costo es excesivo, por ejemplo:

- Rueda Cargada de Hamburgo (HWTD). 60,000 USD.
- Rueda Cargada Francesa. 85,000 USD.
- Pista de Ensayo de Laboratorio Española. 81,000 USD.
- Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA). 110,000 USD.



Justificación

Debido a los altos costos de los equipos comerciales, se ha visto la importancia de fabricar un equipo propio, dicho equipo nos permitirá evaluar la resistencia a la deformación permanente de mezclas asfálticas, bajo condiciones que simulen el efecto del tráfico, con ello se podrá determinar cuales son los tipos de materiales pétreos y asfálticos más adecuados para poder resistir las deformaciones permanentes, observar el comportamiento de la mezcla asfáltica con la presencia de aditivos, así como analizar su comportamiento ante distintas configuraciones de carga, velocidad de circulación, temperatura, etc.

Considerando que el peso vehicular ha ido aumentando con el paso del tiempo y con ello las solicitaciones a las que los pavimentos se encuentran sometidos, se debe tomar en cuenta que son necesarias estructuras del pavimento mejor diseñadas de manera que cumplan con las características para las que fueron elaboradas.

Si contamos con pavimentos confortables y en buenas condiciones, podremos garantizar la seguridad del usuario, el cual juega un papel primordial en las carreteras, esta razón debe ser suficiente para analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas en cuanto a las deformaciones permanentes.

Las deformaciones permanentes provocan superficies irregulares en la carpeta asfáltica, lo cual favorece el efecto de hidropilado, donde el agua producto de la precipitación se acumula en los surcos del pavimento, lo que puede ocasionar un descontrol en el usuario poniendo en riesgo su seguridad.

Si bien el tema de las deformaciones en las mezclas asfálticas no es reciente, los estudios que se han realizado en México respecto a este tema si lo son, ya que debido a la dificultad con la que se cuenta para acceder a equipos de primer nivel, ha traído como consecuencia que no se puedan diseñar adecuadamente las mezclas asfálticas en cuanto a predicción de una deformación permanente. México ha tenido un rezago en este tema. Por ello es importante que se empiecen a adoptar otras tecnologías y adecuarlas a las situaciones reales de nuestro país.



Objetivos

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar, construir y poner a punto un prototipo para la evaluación de la resistencia a las deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas, bajo condiciones que simulen el tráfico en las carreteras, así como realizar ensayos en equipos similares con los que se cuenta en el País, observando el comportamiento de la misma mezcla ante sollicitaciones diferentes y analizar el comportamiento que tienen ante las deformaciones permanentes.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una recopilación bibliográfica acerca de las investigaciones que se han realizado en cuanto a deformaciones permanentes en mezclas asfálticas.
- Diseñar, construir y poner a punto un prototipo para la evaluación de la resistencia a las deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas, que permita simular el tráfico en las carreteras.



Objetivos

- Hacer aportaciones para el mejoramiento del prototipo.
- Realizar ensayos en el prototipo y observar el comportamiento que tienen las mezclas ante las deformaciones permanentes.
- Realizar ensayos en equipos similares con los que cuenta México para la simulación del comportamiento de mezclas asfálticas ante las deformaciones permanentes.
- Observar el comportamiento de una mezcla convencional con asfalto AC-20 y otra con un asfalto modificado con polímero. Evaluar si el uso del polímero contribuye considerablemente a la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica.
- Analizar los resultados obtenidos y observar si existe alguna correlación entre los ensayos realizados en los diferentes equipos.
- Determinar que equipo simula mejor en nuestro país el efecto de los vehículos sobre la superficie de rodamiento.

CAPÍTULO 1

PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA CARRETERAS





CAPÍTULO 1

PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA CARRETERAS

1.1 INTRODUCCIÓN

Se puede definir como pavimento asfáltico a un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, de diferentes materiales seleccionados, adecuadamente compactados, de las cuales por lo menos una está constituida por una mezcla asfáltica, apoyados sobre unas terracerías obtenidas del movimiento de tierras.

Su función es permitir el tránsito de vehículos en forma cómoda, segura y eficiente ofreciendo una buena y resistente superficie de rodamiento, con la rugosidad necesaria para garantizar una buena fricción con la llanta del vehículo, además de soportar y transmitir a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito.



Además de la calidad de los materiales es necesario contar con obras de drenaje suficientes para desalojar el agua de la superficie del pavimento e impedir el hidroneo y que el agua penetre a él, entre estas se encuentran:

- **Sub – dren.** Es una red colectora de tuberías perforadas, colocadas en la parte inferior del pavimento, rellenas de un material que actué como filtro, cuya finalidad es coleccionar y desalojar el agua del suelo o de la terracería.
- **Puente.** Obra de drenaje transversal con un claro mayor de 6 m, construida sobre corrientes o cuerpos de agua.
- **Alcantarilla.** Obra de drenaje transversal al camino con un claro menor de 6 m. Son estructuras que permiten el cruce del agua.
- **Bordillos.** Son estructuras que forman una barrera en los bordos de la corona de los terraplenes para impedir que el agua se desborde por los taludes erosionándolos.
- **Lavaderos.** Son pequeños encauzamientos a través de cubiertas de concreto, lámina, piedra con mortero o piedra acomodada que se colocan en las salidas de alcantarillas o terrenos erosionables, eliminando los daños que originaría la velocidad del agua, además eliminan el agua canalizada por los bordillos.
- **Cunetas.** Son canales en los cortes que se hacen paralelos al eje del camino, se construyen en el borde de la corona al pie del talud del corte. Interceptan el agua que escurre de la corona, del talud del corte y del terreno natural adyacente, para conducirla hacia la corriente natural o a una obra de drenaje transversal y así alejarla lo más pronto posible de la zona que ocupa el camino.
- **Contracunetas.** Son zanjas que se construyen aguas arriba de los cerros de los cortes, su finalidad es interceptar el agua que escurre por las laderas y conducirla hacia alguna cañada inmediata o a una parte baja del terreno, evitando que al escurrir el agua por los taludes los erosione y aumente el caudal de las cunetas.



1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Un pavimento asfáltico está constituido por una o más capas bituminosas generalmente apoyadas sobre dos capas llamadas Base y Sub-base, las cuales a su vez se apoyan sobre una terracería (Fig. 1.2.1).

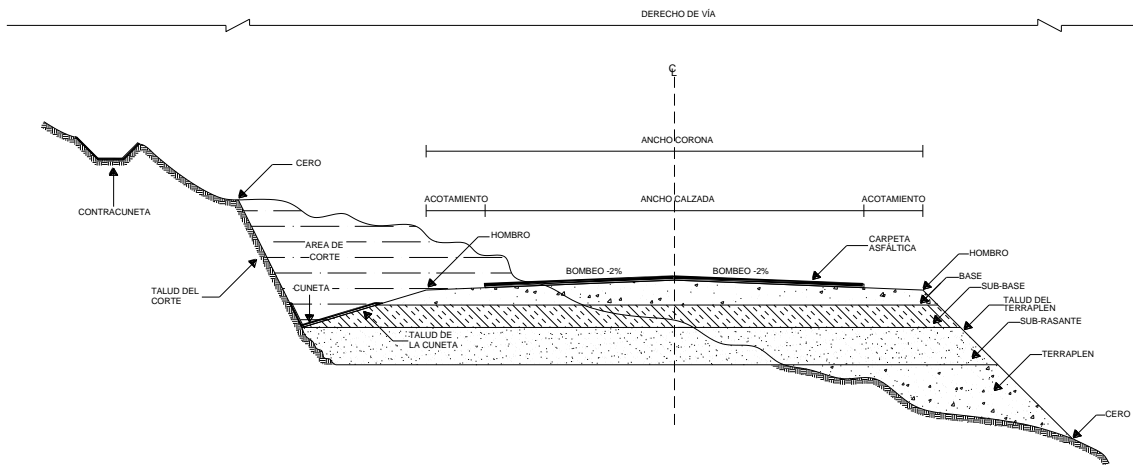


FIGURA 1.2.1

SECCIÓN TRANSVERSAL EN BALCÓN DE UN PAVIMENTO ASFÁLTICO

FUENTE: <ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE: RICO, DEL CASTILLO (2003)>

1.2.1 TERRACERÍAS

Es el volumen de materiales que es necesario excavar y que sirve como relleno para formar la obra. Las terracerías a su vez se dividen en:

- **Capa Sub-rasante** (Parte superior). Es una capa de material adecuado, la cual constituye la capa superior de la terracería, con espesor variable de 30 a 50 cm. Debe recibir y resistir las cargas del tránsito que le son transmitidas por el pavimento, así como transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén y evitar que el pavimento sea absorbido por las terracerías.
- **Cuerpo de terraplén** (Parte inferior). Debe alcanzar la altura necesaria para satisfacer principalmente las especificaciones geométricas, resistir las cargas del tránsito transmitidas por las capas superiores, así como distribuir los esfuerzos a través de su espesor para transportarlos en forma adecuada al terreno natural.



1.2.2 SUB – BASE

Es una capa de materiales pétreos seleccionados que se construye sobre la Sub – rasante. Debe transmitir los esfuerzos a la capa Sub – rasante, reducir efectos de cambios volumétricos y rebote elástico. Reduce el costo del pavimento, ya que se utilizan materiales con especificaciones de calidad menos rigurosas que las de la Base. También actúa como capa aislante que impida la ascensión de finos arcillosos de la Sub – rasante para evitar la contaminación del material de Base del pavimento con dichos finos, ya que ocasionaría en presencia del agua, un descenso en la capacidad de carga de la Base. Corta la ascensión capilar de agua a las capas superiores de la estructura del pavimento.

1.2.3 BASE

Es la capa que se localiza debajo de la Carpeta Asfáltica, es el corazón del pavimento asfáltico, debido a que debe recibir y absorber la mayor parte de los esfuerzos verticales, generalmente se construye sobre una Sub – base, debe soportar adecuadamente las cargas y distribuir esfuerzos a las capas subyacentes en forma adecuada.

1.2.4 CARPETA ASFÁLTICA

Es la capa superior del pavimento asfáltico que proporciona la superficie de rodamiento uniforme a los vehículos que circulan por la carretera; la cual está elaborada con materiales pétreos y un ligante hidrocarbonado.

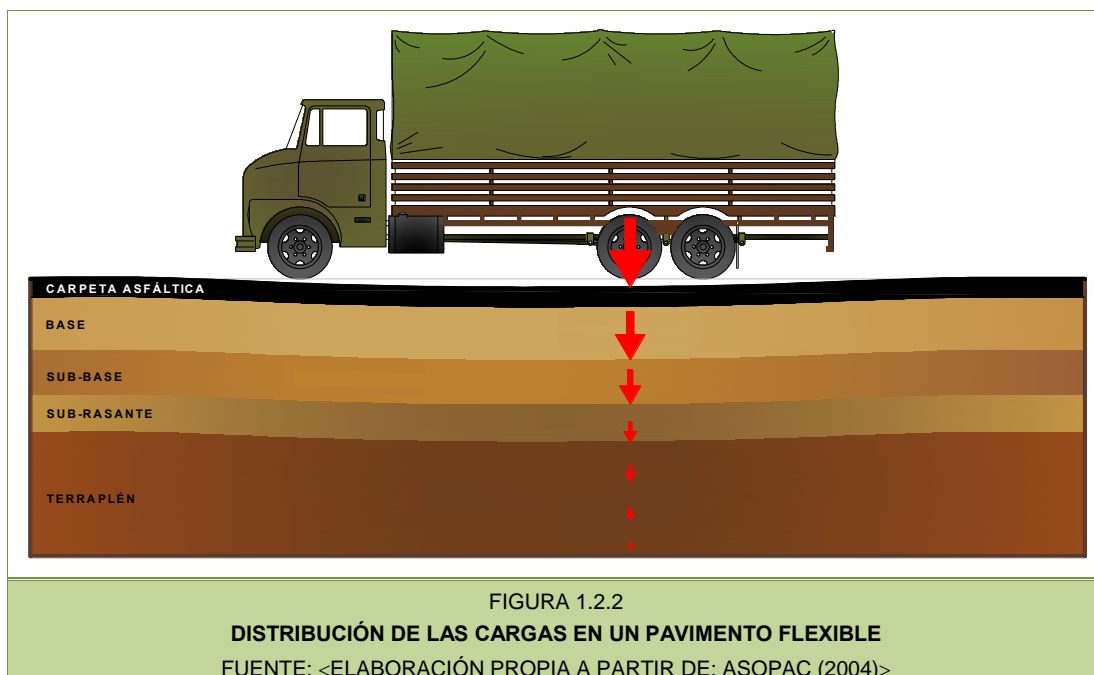
Debe transmitir los esfuerzos provocados por el tránsito a la Base del pavimento. Proporcionar una superficie de rodamiento adecuada a los vehículos; que sea antiderrapante, estable, uniforme, de textura apropiada, que desaloje el agua de la carretera e impedir su entrada a las capas inferiores de la estructura del pavimento, además de tener un color adecuado, de manera que evite los reflejos solares durante el día y de las luces artificiales durante la noche.



Capítulo 1. Pavimentos Asfálticos para Carreteras

La estructura del pavimento debe ser capaz de soportar las cargas inducidas por el tránsito, como se mencionó anteriormente a medida que aumenta la profundidad de las capas, disminuye la calidad de los materiales con los que están elaboradas, ya que las capas mas cercanas a la superficie de rodamiento deben soportar, absorber y disipar los esfuerzos que fueron aplicados a la superficie del pavimento.

En la Figura 1.2.2 se ilustra la forma de distribución de las cargas en la estructura del Pavimento.





1.3 DETERIOROS EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Con el transcurso del tiempo las carreteras se van deteriorando debido al efecto del tránsito, los agentes atmosféricos y a la mala conservación que reciba durante su vida útil. Los deterioros en los pavimentos influyen directamente en la comodidad y seguridad que tiene el usuario al transitar por ellos.

Los deterioros en los pavimentos se clasifican en:

- **Fallas funcionales.** Es cuando el pavimento ya no reúne las condiciones de servicio para las cuales fue creado inicialmente.
- **Fallas estructurales.** Ocurre cuando la estructura del pavimento reduce su capacidad para soportar las cargas, las cuales se reflejan como agrietamientos o hundimientos.

También puede darse la combinación de ambos tipos de fallas

Las causas de los deterioros se pueden asociar en:

- **Tráfico.** Debidos al exceso de las cargas por eje, al exceso de las repeticiones de las mismas y a la alta presión de los neumáticos.
- **Clima.** Altas o bajas temperaturas, drenaje pluvial inadecuado.
- **Diseño inadecuado.** Debido a la mala calidad de los materiales de la estructura del pavimento o a espesores insuficientes.
- **Proceso constructivo.** Un inadecuado control de calidad, pudiendo repercutir en una mala compactación.
- **Conservación insuficiente.** Debido a que los deterioros son inevitables, pero se puede reducir la severidad de los mismos, es importante realizar conservación rutinaria en las carreteras.

Podemos clasificar los deterioros en los pavimentos asfálticos en desprendimientos, agrietamientos y deformaciones, las cuales son las fallas más comunes que se pueden presentar en ellos. A continuación se ilustran algunos de los deterioros que se pueden observar en la superficie de rodamiento de la carretera.



1.3.1 DESPRENDIMIENTOS

Son deterioros donde existe la pérdida de los agregados pétreos o de la capa de rodadura.

DESPRENDIMIENTOS DE LA PELÍCULA DE ASFALTO DEL MATERIAL PÉTREO (MEZCLA ASFÁLTICA)

Perdida del ligante asfáltico, aumentando la textura del pavimento y exponiendo a los agregados pétreos a la acción del tránsito y el clima, los cuales se encuentran parcialmente descubiertos. Se puede deber a una escasa o nula afinidad del material pétreo con el asfalto utilizado en la mezcla.



FIGURA 1.3.4
DESPRENDIMIENTO DE LA PELÍCULA DE ASFALTO DEL MATERIAL PÉTREO



E FIGURA 1.3.3
DESPRENDIMIENTO DEL MATERIAL PÉTREO DE LA CARPETA ASFÁLTICA

DESPRENDIMIENTO DEL MATERIAL PÉTREO DE LA CARPETA ASFÁLTICA

Progresiva desintegración de la superficie del pavimento por pérdida de material fino desprendido de la matriz de arena, provocando una superficie de rodamiento rugosa y eventualmente pequeñas cavidades. Puede ser causada por una escasa cantidad de asfalto en la mezcla o en el riego de sello, la falta de afinidad del material pétreo con el asfalto, falta de compactación de la mezcla, un sobrecalentamiento de la mezcla, cuando ésta se hace en planta, etc.



DESPRENDIMIENTO DE LA CARPETA COMO CAPA

En algunas zonas puede existir desprendimiento total o parcial de la carpeta asfáltica. Puede ser originado por un riego de liga insuficiente o anclaje deficiente de la Carpeta con la Base, una dosificación inadecuada del asfalto – pétreo, por el envejecimiento del asfalto, etc.



FIGURA 1.3.2
DESPRENDIMIENTO DE LA CARPETA COMO CAPA

BACHES

Son desprendimientos locales en que se ha destruido parcial o totalmente el pavimento. Se asocian con agrietamientos y con altos contenidos de agua en los materiales. Inicialmente se desprenden con agregados con el paso de los vehículos y posteriormente se van formando oquedades.



FIGURA 1.3.1
BACHE



1.3.2 AGRIETAMIENTOS

Este tipo de deterioros evolucionan progresivamente, afectando el confort y seguridad del usuario. El tipo de agrietamiento define el criterio de reparación que debe emplearse.



FIGURA 1.3.5
GRIETA LONGITUDINAL EN EL CENTRO

GRIETAS LONGITUDINALES EN EL CENTRO U ORILLAS

Son aberturas longitudinales que pueden abarcar una o varias capas de la estructura del pavimento. Pueden presentarse debido a las deficiencias del tendido de la mezcla asfáltica o en la junta de construcción longitudinal, drenaje insuficiente, etc.

GRIETAS TRANSVERSALES

Son agrietamientos de la carpeta que sigue un patrón transversal o perpendicular al eje del camino. Pueden deberse a un espesor insuficiente de la carpeta asfáltica, a una contracción térmica de la misma, a una deficiencia de juntas transversales de construcción, etc.



FIGURA 1.3.6
GRIETA TRNASVERSAL



FIGURA 1.3.7
GRIETA EN FORMA DE MAPA

GRIETAS EN FORMA DE MAPA

Forma de desintegración de la superficie de rodamiento, en la cual el agrietamiento se desarrolla en un patrón semejante a las subdivisiones políticas de un mapa. Pueden deberse a deflexiones excesivas o deformaciones en la carpeta por acción del tránsito pesado, Carpeta rígida, fuertes solicitaciones del tránsito, etc.

GRIETAS EN FORMA DE PIEL DE COCODRILO

Son grietas en la superficie de la Carpeta Asfáltica, las cuales están interconectadas formando pequeños polígonos que asemejan la piel de un cocodrilo, tienen un patrón regular de polígonos de hasta de 20 cm. Pueden originarse por deflexiones excesivas en la carpeta por acción del tránsito pesado, envejecimiento o fatiga de la carpeta asfáltica, evolución progresiva de agrietamiento tipo mapa, etc.



FIGURA 1.3.8
GRIETA EN FORMA PIEL DE COCODRILO



1.3.3 DEFORMACIONES

Son cambios sufridos debidos a una baja estabilidad de la mezcla asfáltica.

DESPLAZAMIENTOS O CORRIMIENTOS DE LA CARPETA.

Separación de las partículas de asfalto, lo cual provoca el desmoronamiento de la Carpeta Asfáltica. (Principalmente en las orillas). Pueden originarse debido a una baja estabilidad de la mezcla, tránsito pesado antes de compactar debidamente la mezcla, exceso en el asfalto del riego de liga, etc.



FIGURA 1.3.9
DESPLAZAMIENTO DE LA CARPETA ASFÁLTICA



FIGURA 1.3.10
ABULTAMIENTO

PROTUBERANCIAS O ABULTAMIENTO

Desplazamiento de parte del cuerpo de la Carpeta Asfáltica hacia la superficie, formando un montículo de considerables dimensiones. Debidas a la acción del tránsito intenso, estabilidad inadecuada, liga deficiente entre capas, compactación inadecuada, deformaciones plásticas de los materiales, etc.



RODERAS

Son asentamientos o deformaciones permanentes continuas con una longitud mínima de 6 m. de una o varias capas del pavimento, en el sentido longitudinal del camino, se localizan debajo de las rodadas de los vehículos. Originadas por el efecto de tránsito pesado en zonas subdiseñadas o deficientemente construidas del pavimento, paso del tránsito de vehículos o del equipo de construcción sobre la carpeta recién tendida o sin la debida compactación, mala graduación granulométrica o material pétreo de mala calidad, uso de asfalto blando, exceso de asfalto, diseño estructural inadecuado, etc.

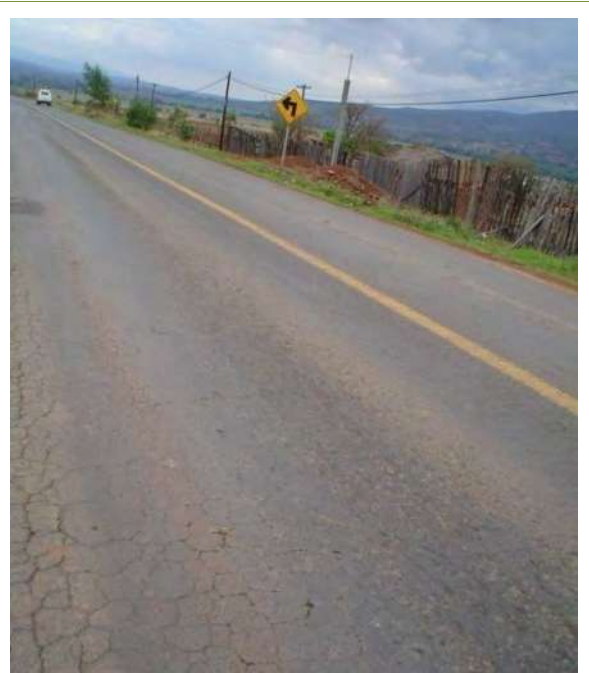


FIGURA 1.3.11
RODERA

En el Capítulo 3 se describirán detalladamente las roderas, también conocidas como deformaciones permanentes, deformaciones plásticas o ahuellamiento.

CAPÍTULO 2

MEZCLAS ASFÁLTICAS





CAPÍTULO 2

MEZCLAS ASFÁLTICAS

2.1 INTRODUCCIÓN

Se conoce como Mezcla Asfáltica a la incorporación y distribución uniforme de un material pétreo y productos asfálticos, elaborados ya sea en planta fija o en el lugar que se van a utilizar, empleando conformadoras o mezcladoras ambulantes. Las mezclas de mejor calidad son las que se elaboran en planta fija, porque el producto asfáltico se reparte con mayor uniformidad en los agregados.

Las mezclas asfálticas pueden clasificarse de distintas formas en base a los parámetros empleados para su elaboración. A continuación se describen brevemente algunas de las clasificaciones empleadas.



POR SU TEMPERATURA DE FABRICACIÓN

- **Mezclas asfálticas en caliente.** Los materiales pétreos y asfálticos son elevados a altas temperaturas para su perfecta incorporación, para posteriormente poder ser extendidas y compactada en la obra a temperaturas superiores a las ambientales.
- **Mezclas asfálticas en frío.** Se pueden elaborar con emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, colocándose en la obra a temperatura ambiente.

POR EL PORCENTAJE DE VACÍOS EN LA MEZCLA

- **Mezclas Densas.** El porcentaje de vacíos varía del 3 al 5%
- **Mezclas Semi- densas.** El porcentaje de vacíos varía del 6 al 10%
- **Mezclas Abiertas.** El porcentaje de vacíos varía del 12 al 20%
- **Mezclas Drenantes.** El porcentaje de vacíos supera el 20%

EN FUNCIÓN DE SU GRANULOMETRÍA

- **Mezclas continuas.** Constituidas por una granulometría continua de los distintos tamaños del material pétreo
- **Mezclas discontinuas.** Constituidas por una granulometría no uniforme de los distintos tamaños del material pétreo.

Para este caso en particular utilizaremos mezclas asfálticas densas, las cuales son muy utilizadas en México; tienen la propiedad de formar una carpeta compacta con el mínimo de vacíos, ya que se usan materiales graduados, lo cual hace que sea uniforme, resistente a las deformaciones producidas por las cargas y prácticamente impermeable.



2.2 ASFALTOS

Se cree que el término asfalto proviene del antiguo término acadio “Asphaltic” (3,000 A.C.), el que fue adoptado por el griego Homero, definiéndolo como “material para hacer calzadas o estabilizaciones”, posteriormente paso al latín, francés, al inglés y al español. (Torrejón O., 2003).

El asfalto es un producto residual natural obtenido del proceso de refinación del petróleo crudo, el cual existe en las capas superiores de la corteza exterior de la tierra. Es un material termoplástico, ya que su comportamiento depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga.

La mayor parte de la constitución química del asfalto está compuesta por carbono e hidrógeno en forma de hidrocarburos, además de sulfuros, oxígeno, nitrógeno y algunos metales como níquel, vanadio, calcio y magnesio en menor cantidad.

Los asfaltos son materiales viscoelásticos, es decir, que sometidos a la acción de una fuerza tienen una respuesta que se puede dividir en dos componentes: una elástica, bajo la cual el material se deforma almacenando la energía que ha sido necesaria para deformarlo, recuperando esta una vez suprimida la carga y una componente viscosa, en la cual el material fluye por acción de la carga disipando la energía en forma de calor, una vez suprimida la carga la misma no es recuperable. (Agnusdei, et al. 2005).

Las características del asfalto son únicas en cada caso y dependen, entre otros factores, del origen del petróleo crudo, del proceso de destilación seguido en refinería, del manejo posterior del residuo asfáltico y de su historia térmica.

El asfalto proporciona una superficie impermeable en la estructura del pavimento, logrando con ello que el agua producto de las precipitaciones, no penetre en ella y por consiguiente no se vean afectadas ninguna de las capas.



2.2.1 PROPIEDADES DEL ASFALTO

PROPIEDADES FÍSICAS

Físicamente es un material de color negro brillante, de consistencia semisólida a temperatura ordinaria, presenta un alto grado de adhesividad e impermeabilidad, es resistente a la mayoría de los ácidos, sales, álcalis y su durabilidad es muy alta en condiciones normales.

Además, posee ciertas características que deben ser consideradas al momento de diseñar las mezclas asfálticas, entre las cuales podemos mencionar:

- **Durabilidad.** Determina por cuanto tiempo conserva el asfalto sus características iniciales una vez expuesto a procesos normales de degradación y endurecimiento.
- **Adhesión y Cohesión.** La adhesión es la capacidad del asfalto de unirse al material pétreo dentro de la mezcla asfáltica y la cohesión es la capacidad que tiene para mantener unidas las partículas del material pétreo.
- **Susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento.** Al estar el asfalto en contacto con el oxígeno, se da el proceso conocido como oxidación, lo que provoca que este pueda endurecerse o envejecerse rápidamente.
- **Susceptibilidad a la temperatura.** Como se mencionó anteriormente, el asfalto se comporta en función de la temperatura y éste comportamiento varía de acuerdo al origen del asfalto. Los asfaltos se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta.

PROPIEDADES QUÍMICAS

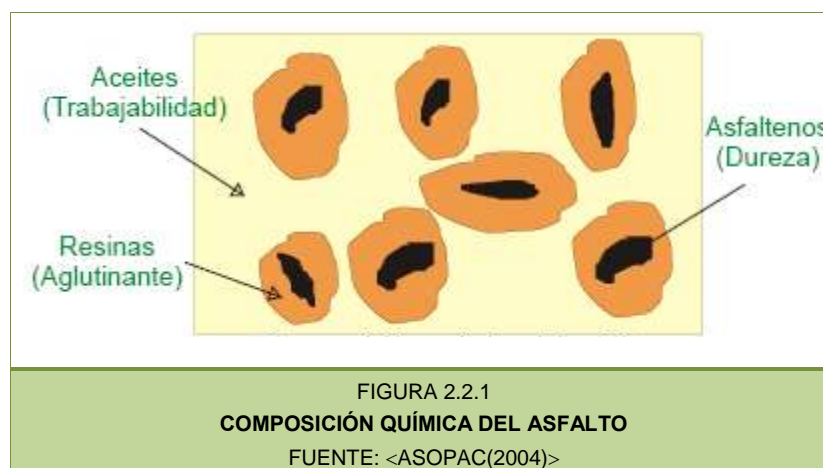
Químicamente el asfalto está compuesto por fracciones de *asfaltenos*, que son la fase dispersa, los cuales le proporcionan el color y la dureza al asfalto; y los *maltenos* (compuestos principalmente por resinas que proporcionan las cualidades adhesivas y los aceites aromáticos que son el medio de transporte para los asfaltenos y las resinas), los maltenos son la fase continua, proporcionándole al asfalto adhesividad, ductilidad y viscosidad.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

Debido a que pueden ocurrir reacciones y cambios químicos en el asfalto, la proporción de asfaltenos y maltenos varía de acuerdo a su temperatura, su exposición a la luz, al oxígeno, al tipo de agregado utilizado en la mezcla asfáltica, al espesor de la película de asfalto. Durante esas reacciones las resinas se convierten gradualmente en asfaltenos y los aceites en resinas, ocasionando un aumento en la viscosidad del asfalto.

La constitución coloidal del asfalto depende de su naturaleza química, el porcentaje de las fracciones de asfaltenos y maltenos, así como sus relaciones entre ellas, (Fig. 2.2.1).



Debido a que los asfaltos están compuestos por moléculas orgánicas, reaccionando con el oxígeno del medio ambiente, se produce un proceso llamado Oxidación, el cual cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto.



2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ASFALTOS

Los asfaltos se pueden clasificar de distintas formas, a continuación se describirán algunas de estas.

CLASIFICACIÓN POR SU VISCOSIDAD

Es una clasificación que se utiliza mundialmente de acuerdo a la consistencia del asfalto. En México, la SCT es la encargada de definir las normas de los materiales empleados en la construcción de carreteras, clasifica a los asfaltos según su viscosidad dinámica a los 60° C como se muestra en la Tabla 2.2.1.

CLASIFICACIÓN	VISCOSIDAD A 60°C PA·S (P ^[1])	USOS MÁS COMUNES
AC-5	50 ± 10 (500 ± 100)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 2.2.2. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación, de liga y poreo con arena, así como en estabilizaciones.
AC-10	100 ± 20 (1 000 ± 200)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 2.2.2. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1 en la Figura 2.2.2.
AC-20	200 ± 40 (2 000 ± 400)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3 en la Figura 2.2.2. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2 en la Figura 2.2.2.
AC-30	300 ± 60 (3 000 ± 600)	<ul style="list-style-type: none"> • En la elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 4 en la Figura 2.2.2. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zonas 3 y 4 en la Figura 2.2.2. • En la elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos de impregnación.

[1] Poises

TABLA 2.2.1

CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS SEGÚN SU VISCOSIDAD DINÁMICA A 60°C

FUENTE <NORMA N·CMT·4-05-001/06>



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas



Entre más viscoso sea un asfalto, puede ser utilizado para trabajar a mayores temperaturas, ya que pueden mantener con mayor facilidad su consistencia, pero al someterse a bajas temperaturas puede rigidizarse, lo que ocasionaría una falla en la carpeta asfáltica, es por ello que para las bajas temperaturas se pueden utilizar asfaltos con baja viscosidad.

La viscosidad es un parámetro determinante al momento de elegir el asfalto que se empleará en el diseño de la mezclas asfáltica.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

El material asfáltico debe cumplir con ciertos requisitos de calidad, los cuales se muestran en la Tabla 2.2.2.

CARACTERÍSTICAS	CLASIFICACIÓN			
	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30
Del cemento asfáltico original:				
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s (P ^[1])	50 ± 10 (500 ± 100)	100 ± 20 (1,000 ± 200)	200 ± 40 (2,000 ± 400)	300 ± 60 (3,000 ± 600)
Viscosidad cinemática a 135°C; mm ² /s, mínimo (1 mm ² /s = 1 centistoke)	175	250	300	350
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, mínimo	80	110	120	150
Penetración a 25° C, 100 g, 5 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	140	80	60	50
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	177	219	232	232
Solubilidad; %, mínimo	99	99	99	99
Punto de reblandecimiento; °C	37 - 43	45 - 52	48 - 56	50 - 58
Del residuo de la prueba de la película delgada:				
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1.0	0.5	0.5	0.5
Viscosidad dinámica a 60°C; Pa·s (P ^[1]), máximo	200 (2,000)	400 (4,000)	800 (8,000)	1,200 (12,000)
Ductilidad a 25° C y 5 cm/min; cm, mínimo	100	75	50	40
Penetración retenida a 25° C; %, mínimo	46	50	54	58

[1] Poises

TABLA 2.2.2
**REQUISITOS DE CALIDAD PARA CEMENTO ASFÁLTICO
CLASIFICADO POR SU VISCOSIDAD DINÁMICA A 60°C**
FUENTE <NORMA N·CMT·4·05·001/06>

CLASIFICACIÓN POR EL AGENTE MODIFICADOR

El número y tamaño de los vehículos en las carreteras se ha venido incrementando, trayendo como consecuencia una sobrecarga en los pavimentos asfálticos, ocasionando con ello el deterioro prematuro de ellos. Es por esto que en todo el mundo se han realizado estudios para mejorar el comportamiento de los asfaltos, para con ello alargar la vida útil de las mezclas asfálticas.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

Los asfaltos pueden ser modificados para mejorar sus características reológicas, de elasticidad, adherencia al material pétreo, se puede reducir la permeabilidad y la velocidad de oxidación, aumentan la resistencia a la tracción y la susceptibilidad térmica.

Debido a que existen distintos tipos de modificadores, es importante saber que característica se desea mejorar en el asfalto, ya que con esto se logrará elegir el aditivo adecuado.

La Norma N·CMT·4·05·002/06 “*Calidad de materiales asfálticos modificados*” de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, clasifica de la siguiente forma a los principales modificadores de asfalto:

- **Polímero tipo I.** Mejoran el comportamiento de mezclas asfálticas tanto altas como a bajas temperaturas, se fabrican con bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque como los SBS, SB, entre otros.
- **Polímero tipo II.** Mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas a bajas temperaturas, se fabrica con base en polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno – Látex o Neopreno – Látex.
- **Polímero tipo III.** Mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas; se fabrica con un polímero de tipo elastómero, mediante configuraciones como EVA, o poliestireno de alta o baja densidad tipo HDPE, LDPE, entre otras.
- **Hule Molido de neumáticos.** Mejora la resistencia a la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas; se fabrica con el producto de la molienda de neumáticos.

En la actualidad es posible utilizar cementos asfálticos modificados con polímeros, los cuales exhiben un mejor comportamiento mecánico ante elevados esfuerzos de tráfico y temperaturas extremas, aumentando la resistencia al ahuellamiento. El alto costo de estos asfaltos hace que su uso se limite sólo a proyectos de aplicaciones especializadas, que justifiquen una mayor inversión.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y la otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella.

Para que los asfaltos con polímeros consigan las prestaciones óptimas, se debe seleccionar cuidadosamente el asfalto base (es necesario que los polímeros sean compatible con el material asfáltico), el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje.

Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de ésta el polímero solo actúa como un filler; y por debajo de ésta, pasan a estar muy solubilizados y aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.

Los polímeros compatibles producen rápidamente un asfalto estable, sistemas convencionales de preparación de asfaltos modificados con polímeros, que consisten en grandes recipientes de mezclado con paletas agitadoras a velocidades lentas, o recipientes especiales que favorecen la recirculación con agitadores mecánicos de corte de gran velocidad.

El polímero puede venir en polvo, en forma de pequeñas bolitas (pellets) o en grandes panes. La temperatura de mezclado depende del tipo de polímero utilizado.

Al incorporar algún polímero al asfalto es posible modificar su relación viscosidad-temperatura, permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas, en la tabla 2.2.3 se pueden observar algunos de los polímeros utilizados para la modificación del asfalto.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

ELASTÓMEROS	PLASTÓMEROS
NATURAL	EVA
SBS	EMA
SBR	PE
EPDM	PP
PBD	POLIESTIRENO

TABLA 2.2.3

CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS QUE SE UTILIZAN PARA LA MODIFICACIÓN DE ASFALTOS

FUENTE < CARSWELL, CRUZ (2002) >

Los elastómeros son materiales elásticos flexibles que al estirarlos vuelven a su posición original. Dentro de ellos podemos encontrar:

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

Los plastómeros son materiales que si al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no vuelven a su longitud original al cesar la tensión. Tienen deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad. Dentro de ellos podemos encontrar:

- **EVA.** Etileno-acetato de vinilo.
- **EMA.** Etileno-acrilato de metilo.
- **PE.** (Polietileno) tiene buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, así como un buen comportamiento a bajas temperaturas.
- **PP.** (Polipropileno).
- **Poliestireno.** Son poco utilizados.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

En la realización de los ensayos se decidió utilizar un asfalto virgen AC-20 y uno modificado con un polímero conocido comercialmente con el nombre Elvaloy. A continuación se mencionarán las características de éste modificador.

DuPont™ Elvaloy® Terpolímero Elastomérico Reactivo (RET). Es un modificador de asfalto que puede evitar que las carreteras se agrieten por el frío y se les abran surcos por el calor, dados los extremos ciclos de temperaturas bajas y altas. Ha sido probado con éxito desde 1991 en condiciones extremas en Asia y Europa, lo que ofrece un paso más seguro para los usuarios de las carreteras.

Para poder ser modificado en planta, el asfalto debe estar a una temperatura entre los 184° y 190°C, además de tener una turbulencia $\geq 10,000$ Re. Se adicionan de 6 a 12 kg por agitador.

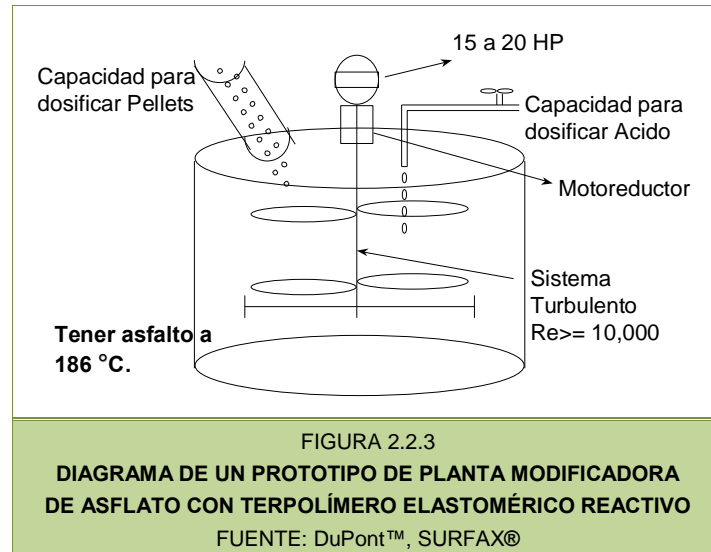
La presentación del Terpolímero Elastomérico Reactivo es de pellets de resina, los cuales son empacados en cajas ó sacos para el manejo adecuado del polímero.

El proceso de modificación con Terpolímero Elastomérico Reactivo puede describirse en los siguientes pasos:

1. Incremento de la temperatura de asfalto.
2. Adición de polímero (la tasa de adición debe ser baja).
3. Homogenización de polímero en el asfalto.
4. Adición de catalizador “Ácido Polifosfórico” (H_3PO_4).
5. Finalización de la reacción.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas



Después del paso 1, el proceso tiene una duración de 4 a 5 horas dependiendo de la agitación, volumen a modificar y reactividad del asfalto base. El proceso de modificación no necesita un molino de alto esfuerzo cortante como en el caso de otros modificadores y tanto el equipo requerido como el proceso para la modificación son relativamente sencillos.

Para permitir la dispersión del Terpolímero Elastomérico Reactivo en el Asfalto y evitar la polimerización, la incorporación del Elvaloy debe hacerse lentamente a razón de 300 kg / hr.

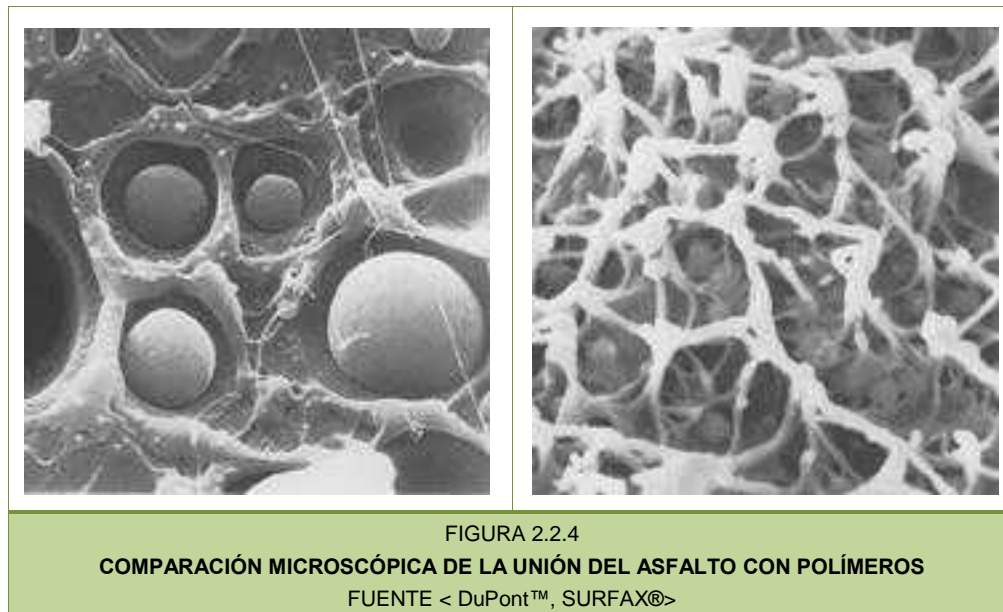
Una vez terminada la adición del Terpolímero Elastomérico Reactivo, se debe agitar el asfalto durante un periodo mínimo de 2 hrs, o hasta que no se perciban grumos en el asfalto. Posteriormente se le adiciona el catalizador (Ácido Polifosfórico) y se deja reaccionar durante 30 ó 40 min. Transcurrido estos tiempos es posible obtener un muestreo del asfalto modificado.

A diferencia de otros aditivos que solo se mezclan con el asfalto y pueden ser separados después de un tiempo, el Terpolímero Elastomérico Reactivo se une químicamente al asfalto, por ello no puede haber futuras separaciones.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

En la Figura. 2.2.4, imagen de la izquierda se puede observar la unión del asfalto con otro polímero, donde solo se mezclan uno con el otro y en la imagen de la derecha se observa como el Terpolímero Elastomérico Reactivo reacciona formando cadenas con el asfalto.



Sus principales ventajas son:

- Reduce la deformación permanente.
- Reduce el agrietamiento a la fatiga.
- Reduce el agrietamiento por baja temperatura.
- Mejora la adherencia del asfalto-pétreo.
- Aumenta la calidad del asfalto.
- Prolonga la vida útil del asfalto.
- Brinda estabilidad, al almacenamiento y transporte a grandes distancias, en frío o caliente.
- Cumple con características de Polímero tipo I, ASTM 5976 / AASHTO TF 31.
- Es fácil de manejar y se requiere de menor equipo para ser modificado además de que la limpieza de este es más sencilla, se simplifica el tendido y la compactación.
- Asumiendo buenas bases, métodos constructivos, pétreos adecuados y un uso correcto en su adición, puede otorgar una vida útil del 200% respecto a una carpeta sin aditivo.
- La capacidad estructural del asfalto mejora un mínimo de 30%.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

El asfalto modificado debe cumplir con los requisitos de calidad de la Tabla 2.2.4

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE CEMENTO ASFÁLTICO (TIPO DE MODIFICADOR)				
	AC-5 (TIPO I Ó II)	AC-20 (TIPO I)	AC-20 (TIPO II)	AC-30 (TIPO III)	AC-20 (HULE MOLIDO)
Del cemento asfáltico modificado:					
Viscosidad Saybolt-Furol a 135 °C; s, máximo	500	1,000	1,000	1,000	-----
Viscosidad rotacional Brookfield a 135°C; Pa s, máximo	2	4	3	4	-----
Viscosidad rotacional Brookfield (tipo Haake) a 177°C; Pa s, máximo	-----	-----	-----	-----	7
Penetración					
• A 25°C, 100 g, 5 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	80	40	40	30	30
• A 4°C, 200 g, 60 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	40	25	25	20	15
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	220	230	230	230	230
Punto de reblandecimiento; °C, mínimo	45	55	55	53	57
Separación, diferencia anillo y esfera; °C, máximo	3	3	3	4	5
Recuperación elástica por torsión a 25°C; %, mínimo	25	35	30	15	40
Resiliencia, a 25°C; %, mínimo	20	20	20	25	30
Del residuo de la prueba de la película delgada (3.2 mm, 50 g):					
Pérdida por calentamiento a 163°C; %, máximo	1	1	1	1	1
Penetración r a 4° C; 200 g, 60 s; %, mínimo	-----	-----	-----	-----	10
Penetración retenida a 4° C; 200 g, 60 s; %, mínimo	65	65	65	55	75
Recuperación elástica en ductilómetro a 25° C; % mínimo	50	60	60	30	55
Incremento en temperatura anillo y esfera; °C, máximo	----	----	----	----	10
Módulo Reológico de corte dinámico a 76° C (G*/sen δ); kPa, mínimo	----	2.2	2.2	2.2	2.2
Módulo Reológico de corte dinámico a 64° C (G*/sen δ); kPa, mínimo	2.2	-----	-----	-----	-----
Ángulo de fase (δ) [visco-elasticidad], a 76° C; ° (grados), máximo	-----	75	70	75	-----
Ángulo de fase (δ) [visco-elasticidad], a 64° C; ° (grados), máximo	75	-----	-----	-----	-----

TABLA 2.2.4
REQUISITOS DE CALIDAD PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS AC-5 Y AC-20
FUENTE <NORMA N-CMT-4-05-002/06>



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

CLASIFICACIÓN POR EL GRADO DE DESEMPEÑO DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

El grado de desempeño o PG, por sus siglas en inglés (Performance Grade), es un nuevo método de clasificación del cemento asfáltico mediante el cual se determina el rango de temperaturas máxima a mínima entre las cuales el cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente, está adecuado para resistir deformaciones o agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga en condiciones de trabajo que se han relacionado con ensayos especiales y simulaciones de envejecimiento a corto y largo plazo.

La nomenclatura para expresar el grado de desempeño de un asfalto es: *PG XX-YY*, donde XX representa la temperatura máxima de trabajo permitida para ese asfalto (en grados Celsius) y YY representa la temperatura mínima de trabajo permitida para el mismo asfalto.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes en su Norma N·CMT·4·05·004/08 “*Calidad de materiales asfálticos Grado PG*”, divide a la República Mexicana en 3 zonas y por consiguiente en 3 grados PG. (Figura. 2.2.5).





Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

El PG permite seleccionar el cemento asfáltico adecuado en función del clima y de la magnitud del tránsito a la que estará sujeto el pavimento.

Una vez elegida la temperatura máxima del Grado PG según el clima, es ajustada a la intensidad de tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 ton acumulados durante un periodo de servicio de 10 años y de acuerdo a la velocidad de operación. (Tabla 2.2.5).

INTENSIDAD DEL TRÁNSITO ($\sum L_{10}$)^[1]	GRADO PG SELECCIONADO POR EL CLIMA	AJUSTE POR INTENSIDAD DEL TRÁNSITO	AJUSTE POR VELOCIDAD LENTA (ENTRE 10 Y 30 KM/HR)	AJUSTE POR TRÁNSITO DETENIDO (CRUCEROS)
$(\sum L_{10}) < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \sum L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$(\sum L_{10}) > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

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

TABLA 2.2.5
**AJUSTES DEL GRADO PG SELECCIONADO POR CLIMA, DE ACUERDO CON LA
INTENSIDAD DEL TRÁNSITO ESPERADO Y CON LA VELOCIDAD DE OPERACIÓN**
FUENTE <NORMA N-CMT-4-05-004/08>

Según el grado de desempeño del cemento asfáltico, deben cumplir con los requisitos de calidad mostrados en la Tabla 2.2.6



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

GRADO DE COMPORTAMIENTO	PG 64				PG 70				PG 76			PG 82			PG 88		
	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-22	-28	-34	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C.	64				70				76			82			88		
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C.	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34
ASFALTO ORIGINAL																	
Punto de inflamación Cleveland ^[1] , °C, mín.	230																
Viscosidad dinámica a 135° C ^[1] ; Pa·s (P ^[2]), máx.	3																
Módulo Reológico de corte dinámico (G*/sen δ) ^{[1][3]} , kPa, mín.	1																
• Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C.	64				70				76			82			88		
DESPUÉS DE LA PRUEBA DE PELÍCULA DELGADA Y AIRE DE HORNO ^[1]																	
Pérdida por calentamiento; %, máx.	1																
Módulo Reológico de corte dinámico (G*/sen δ) ^[1] ; kPa, mín.	2.2																
• Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C.	64				70				76			82			88		
DESPUÉS DEL ENVEJECIMIENTO EN VASIJA DE PRESIÓN TEMPERATURA Y AIRE																	
Temperatura de envejecimiento PAV; °C.																	
• En climas normales.	100				100				100			100			100		
• En climas desérticos.	100				110				110			110			110		
Índice de endurecimiento físico ^[4] , máx.	Reportar																
Módulo Reológico de corte dinámico (G*/sen δ) ^[1] ; kPa, mín.	5,000																
• Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C.	25	22	19	16	28	25	22	19	31	28	25	34	31	28	34	31	28
Rigidez de flexión S(t) ^{[1][5]} , MPa, máx (m=0.3 mín).	300																
• Temperatura de prueba @ 60 s, °C.	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-12	-18	-24	-12	-18	-24

[1] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula de la Norma N-CMT-4-05-004/08.

[2] Poises.

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

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

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

**TABLA 2.2.6
REQUISITOS DE CALIDAD PARA CEMENTOS ASFÁLTICOS GRADO PG**

FUENTE <NORMA N-CMT-4-05-004/08>



2.2.3 PRUEBAS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Las pruebas que se encuentran dentro de la Normativa de la SCT para determinar las propiedades de los cementos asfálticos son:

ENSAYOS DE VISCOSIDAD

La viscosidad es la resistencia del material a fluir, depende de la temperatura del asfalto, su determinación a diferentes temperaturas puede dar una idea de su susceptibilidad térmica.

La Viscosidad Dinámica es calculada a los 60°C. Durante la prueba se determina el tiempo en que tardan en pasar a través de un tubo capilar vacío 20 ml del material a probar, bajo condiciones de presión y temperatura preestablecidas, corregido por el factor de calibración del viscosímetro.

La Viscosidad Cinemática determina la consistencia de los cementos asfálticos mediante sus características de flujo a una temperatura de 135°C, es aplicable a cementos asfálticos que tengan una viscosidad de 30 a 100,000 mm²/s.

La Viscosidad Saybolt – Furol permite conocer las características de flujo a una temperatura de 135°C para los cementos, de 25°C y 50°C para las emulsiones y de 50°C y 60°C para los asfaltos rebajados, además de poder realizarse a otras temperaturas logrando con ello conocer la susceptibilidad al calor de los cementos asfálticos y determinar las viscosidades apropiadas para su utilización. La prueba consiste en determinar el tiempo que tardan en pasar 60 cm³ del material a probar a través de un orificio Furol, instalado en un tubo de viscosidad Saybolt, bajo condiciones de carga y temperatura establecidas.

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



ENSAYO DE PENETRACIÓN

La penetración es una medida de la consistencia del asfalto a la temperatura media de servicio, 25°C. Sus valores son dados en décimas de milímetro. Con éste ensayo se puede definir si el asfalto es líquido, semisólido o sólido.

La prueba se realiza mediante la penetración de una aguja en una muestra de prueba (cementos asfálticos, residuos de por destilación de las emulsiones o asfaltos rebajados) bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.

ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN

Con esta prueba es posible determinar la temperatura mínima a que el asfalto produce flamas instantáneas al estar en contacto con el fuego directo, así como aquella que inicia su combustión.

La prueba consiste en colocar una muestra de asfalto en una copa abierta Cleveland, en donde se incrementa paulatinamente su temperatura hasta lograr que al pasar una flama por la superficie de la muestra se produzcan en ellas flamas instantáneas, la temperatura correspondiente se denomina punto de inflamación. Si se continúa elevando la temperatura de la muestra se llega al punto en que se inicia la combustión del material, la temperatura correspondiente se denomina punto de combustión.

ENSAYO DE SOLUBILIDAD

Mediante este ensayo es posible conocer la pureza del material asfáltico, en cuanto a su contenido de sustancias sólidas.

La prueba consiste en disolver en tricloroetileno o tricloroetano, una muestra de cemento asfáltico, filtrándola a través de una capa de fibra de asbesto, donde se retiene la fracción insoluble.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

ENSAYO DE PUNTO DE REBLANDECIMIENTO

Como los cementos asfálticos no tienen un punto de fusión definido, por ser materiales termoplásticos, se ha definido un punto de ablandamiento convencional, determinado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado de fluidez a la cual el asfalto no puede soportar una carga de una bola de acero dentro de un anillo, por lo que la prueba también se denomina “de anillo y bola”.

La prueba se basa en la determinación de la temperatura a la cual una esfera de acero produce una deformación de 25 mm, en una muestra de asfalto sostenida en un anillo horizontal, que se calienta gradualmente dentro de un baño de agua o glicerina.

ENSAYO EN EL RESIDUO DE LA PELÍCULA DELGADA

Con este ensayo es posible determinar el endurecimiento sufrido por los cementos asfálticos que en películas delgadas de pequeño espesor se someten a los efectos del calor y el aire.

La prueba consiste en someter una muestra de cemento asfáltico a un proceso de calentamiento para producir un residuo al cual, dependiendo del tipo de cemento asfáltico que se está probando, se le realizan diversas pruebas como: pérdida de masa que experimentó, viscosidad dinámica, la penetración que conserva respecto la del cemento asfáltico original, ductilidad, etc.

ENSAYO DE DUCTILIDAD

La ductilidad es la capacidad para mantenerse cohesionado bajo las deformaciones inducidas por el tránsito.

El ensayo consiste en someter las muestras de asfalto a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua de igual densidad, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima en centímetros que se estira la probeta hasta el instante de rotura.



2.3 AGREGADOS PÉTREOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los pétreos son partículas granulares de distinto tamaño, producto de la desfragmentación natural o artificial de distintos tipos de roca de la corteza terrestre. Constituyen entre el 90 y 95% en peso de la mezcla asfáltica.

2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS

En la corteza terrestre existen 3 tipos de rocas de acuerdo a su formación, las cuales son:

- **Rocas Ígneas.** Son producto del enfriamiento y solidificación del magma, dentro de estas existen las intrusivas, las cuales están formadas a partir del magma que queda atrapado en las profundidades de la corteza terrestre y las extrusivas, formadas por el material que vertió fuera el volcán.
- **Rocas Sedimentarias.** Son formadas por la acumulación y consolidación de sedimentos de materiales procedentes de la erosión de rocas anteriores.
- **Rocas Metamórficas.** Son rocas ígneas o sedimentarias las cuales han sido transformadas por procesos de intensa presión, por calor dentro de la tierra o por reacciones químicas.

2.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PÉTREOS

De acuerdo a su origen, los materiales pétreos utilizados en los pavimentos asfálticos se clasifican en:

- **Agregados naturales.** Son los que como su nombre lo dice, se utilizan en su forma natural o con muy poco procesamiento. Los constituyen partículas producidas en procesos naturales de erosión y degradación. Los principales agregados utilizados son la grava y la arena. Las partículas de que pasan la malla No. 200 son conocidas como *filler* o polvo mineral.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

- **Agregados procesados.** Son aquellos que antes de ser utilizados son triturados y cribados. La función del proceso de trituración es cambiar su textura superficial (de lisa a rugosa), cambiar la forma de la partícula (de redonda a angular), reducir y mejorar la distribución granulométrica de las partículas, además cuando son rocas y piedras grandes se reduce su tamaño a uno que sea manejable.
- **Agregados sintéticos.** Estos no existen en la naturaleza y son el resultado del procesamiento físico o químico de los materiales. Son subproductos de procesos industriales de producción como el refinamiento de metales, o producidos mediante el procesamiento de materias primas. Normalmente tienen una alta resistencia al desgaste.

De acuerdo a su tamaño, los materiales pétreos empleados en las mezclas asfálticas se clasifican en:

- **Gravas.** (Símbolo G), partículas de 3" (76 mm) al tamaño de la malla No.4 (1/4" ó 4.69 mm). Dentro de estas se encuentran:
Grava gruesa. Partículas de 3" a 3/4"
Grava fina. Partículas de 3/4" a la malla No.4
- **Arenas.** (Símbolo S), partículas de la malla No.4 a la malla No.200. Dentro de estas se encuentran:
Arena gruesa. De la malla No.4 a la malla No.10
Arena media. De la malla No.10 a la malla No.20
Arena fina. De la malla No.20 a la malla No.200
- **Filler o polvo mineral.** Es la parte total del material pétreo que pasa la malla No.200

2.3.3 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

Debido a la gran cantidad de materiales pétreos que requiere una mezcla asfáltica, su calidad es de vital importancia, por ello deben contar con ciertas características entre las que se encuentran:

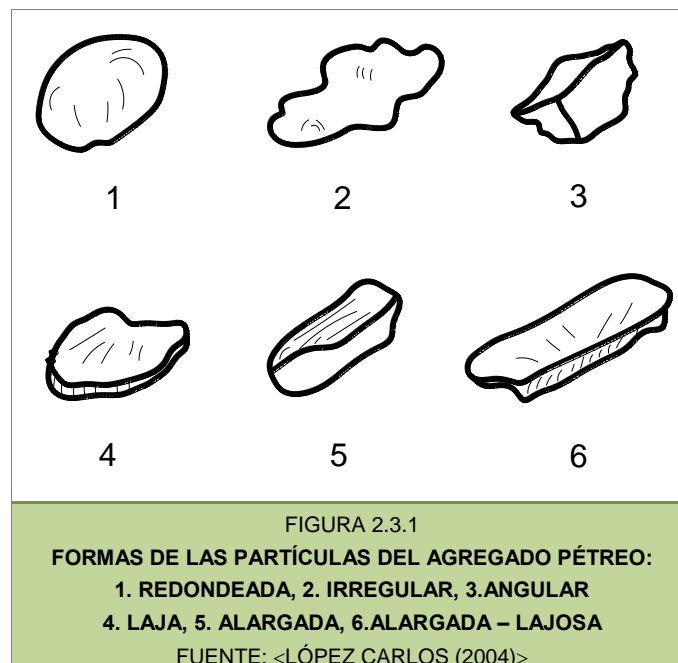
- **Granulometría y tamaño máximo de la partícula.** Los agregados pétreos de una mezcla asfáltica deben estar dentro de un rango de tamaños de partículas y a su vez estos deben



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

tener ciertas proporciones. La granulometría se determina a partir de pasar al material pétreo por una serie de mallas que se clasifican de acuerdo al tamaño de su abertura.

- **Limpieza.** Los materiales deben contener la menor cantidad posible de vegetación, arcilla, partículas blandas, etc. Estos materiales en cantidades excesivas desfavorecen el comportamiento de las mezclas asfálticas.
- **Dureza.** Los pétreos deben ser lo suficientemente resistentes durante su colocación, compactación y vida de servicio del pavimento, evitando el proceso de abrasión y degradación.
- **Forma de la partícula.** Ésta afecta la trabajabilidad de la mezcla durante el tiempo de colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida (Fig. 2.3.1). La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida útil.



- **Textura de la superficie.** La textura superficial determina la trabajabilidad, la resistencia final de la mezcla asfáltica y las características de resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento. El asfalto se adhiere con mayor facilidad a las partículas con superficie rugosa, la cual se puede adquirir mediante la trituración de los materiales.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

- **Capacidad de absorción.** Es la capacidad que tiene un agregado de absorber determinada cantidad de agua o asfalto. Si el agregado tiene una alta capacidad de absorción seguirá absorbiendo asfalto después del mezclado inicial en la planta y se requerirán mayores cantidades de asfalto.
- **Afinidad con el asfalto.** Es la capacidad que tiene el agregado para quedar fijo con el ligante asfáltico, sin que pueda desplazarse en presencia del agua, tránsito y cambios bruscos de temperatura.

2.3.4 REQUISITOS DE CALIDAD

De acuerdo a la Norma N-CMT-4-04-/08 “Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas” de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, los requisitos de calidad de los materiales pétreos para carpetas asfálticas de granulometría densa para cualquier valor de ΣL son los mostrados en la Tabla 2.3.1.

MALLA		TAMAÑO NOMINAL DEL MATERIAL PÉTREO				
Abertura mm	Designación	9.5 mm ($\frac{3}{8}$ "	12.5 mm ($\frac{1}{2}$ "	19 mm ($\frac{3}{4}$ "	25 mm (1"	37.5 mm ($1\frac{1}{2}$ "
		Porcentaje que pasa				
50	2"	-----	-----	-----	-----	100
37.5	$1\frac{1}{2}$ "	-----	-----	-----	100	90 – 100
25	1"	-----	-----	100	90 – 100	74 – 90
19	$\frac{3}{4}$ "	-----	100	90 – 100	79 – 90	62 – 79
12.5	$\frac{1}{2}$ "	100	90 – 100	72 – 90	58 – 71	46 – 60
9.5	$\frac{3}{8}$ "	90 – 100	76 – 90	60 – 76	47 – 60	39 – 50
6.3	$\frac{1}{4}$ "	70 – 81	56 – 69	44 – 57	36 – 46	30 – 39
4.75	No. 4	56 – 69	45 – 59	37 – 48	30 – 39	25 – 34
2	No. 10	28 – 42	25 – 35	20 – 29	17 – 24	13 – 21
0.85	No. 20	18 – 27	15 – 22	12 – 19	9 – 16	6 – 13
0.425	No. 40	13 – 20	11 – 16	8 – 14	5 – 11	3 – 9
0.25	No. 60	10 – 15	8 – 13	6 – 11	7 – 9	2 – 7
0.15	No. 100	6 – 12	5 – 10	4 – 8	2 – 7	1 – 5
0.075	No. 200	2 – 7	2 – 6	2 – 5	1 – 4	0 – 3

TABLA 2.3.1

**REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL PÉTREO PARA CARPETAS
ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa (PARA CUALQUIER VALOR DE ΣL)**

FUENTE <NORMA N-CMT-4-04/08>



Además deberá cumplir con los requisitos de la Tabla 2.3.2

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

TABLA 2.3.2
REQUISITOS DE CALIDAD DEL MATERIAL PÉTREO PARA CARPETAS
ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA DENSA (PARA CUALQUIER VALOR DE ΣL)
FUENTE: <NORMA N-CMT-4-04/08>

2.3.5 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes es la encargada de regular las Normas para los materiales empleados en la construcción de los pavimentos, dentro de los ensayos que es necesario realizar para la caracterización de los materiales pétreos se pueden mencionar las siguientes:

GRANULOMETRÍA

Con esta prueba se determina la composición por tamaños de las partículas del material pétreo que se empleará en la mezcla asfáltica, lo cual se logra pasando el material por una serie de mallas con aberturas determinadas, pasándolas por la abertura mayor obteniendo el peso retenido, haciéndolo sucesivamente para cada una de las mallas hasta llegar a la que tiene la abertura menor. Finalmente se calcula el porcentaje retenido y el que pasa cada una de las mallas.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

DENSIDAD RELATIVA

La finalidad de esta prueba es conocer la masa de sólidos por unidad de volumen de dichos sólidos sin vacíos en cada una de sus fracciones, ya sea arena con finos o grava, respecto a la densidad del agua.

EQUIVALENTE DE ARENA

Con esta prueba se determina el contenido y actividad de los materiales finos o arcillosos presentes en los materiales pétreos en las mezclas asfálticas. En esta prueba es separada la arena de la arcilla.

PARTÍCULAS ALARGADAS Y LAJEADAS

En esta prueba se separa el material retenido en la malla No.4 y se determina la forma de cada partícula mediante un calibrador de espesor y de longitud.

DESGASTE DE LOS ÁNGELES

Con esta prueba se determina la resistencia a la trituración de los materiales pétreos, los cuales son colocados en un cilindro giratorio y se someten al impacto de unas esferas metálicas durante un tiempo determinado, se mide la variación granulométrica antes y después del ensayo.

INTEMPERISMO ACELERADO

En esta prueba las gravas son sometidas a varios ciclos de saturación y secado utilizando una solución saturada de sulfato de sodio o magnesio, se mide la diferencia antes y después de haber sido sometido al tratamiento, finalmente se calcula la degradación esperada por intemperismo de los materiales pétreos.



2.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Como se mencionó anteriormente, las mezclas asfálticas deben proporcionar una superficie de rodamiento uniforme a los vehículos que circulan por el pavimento. Están elaboradas con un ligante asfáltico que es el encargado de aglutinar las partículas en una masa cohesiva y el agregado pétreo el cual es ligado por el material asfáltico actuando como esqueleto mineral, aportando resistencia y rigidez a la mezcla.

Las mezclas asfálticas son fabricadas en plantas fijas o móviles, para posteriormente ser trasladadas a la obra, extendidas y finalmente compactadas.

Debido a las diferentes calidades de los materiales pétreos y de los ligantes asfálticos que existen para la fabricación de las mezclas asfálticas, su comportamiento es afectado por las propiedades individuales de estos materiales y por la interrelación que exista dentro de la mezcla. Diversas investigaciones han demostrado que el comportamiento de las mezclas asfálticas depende del tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura de servicio, el cual puede ser mejorado considerablemente con la adición de algún polímero al asfalto.

Para lograr un óptimo desempeño de la mezcla asfáltica y que la superficie del pavimento cumpla con las características para las cuales fue diseñada, es necesario considerar los factores que pueden afectar su vida útil, entre los cuales se encuentran:

- El tamaño máximo de los agregados pétreos, así como su distribución granulométrica.
- El tipo y contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos de aire, los vacíos llenados con asfalto.
- El control de calidad en obra, considerando la temperatura y forma de compactación de la mezcla.



2.4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS

La SCT en su Norma N-CMT-4-05-003/08 “*Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*” define a las mezclas asfálticas con el producto obtenido de la incorporación y distribución uniforme de un material pétreo. Clasificándolas según su procedimiento de mezclado en:

MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

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

Mezcla asfáltica de granulometría densa. Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37.5 mm ($1\frac{1}{2}$ ”) y 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ ”). Generalmente se utilizan en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en que se requiere una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

Mezcla asfáltica de granulometría abierta. Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre 12.5 mm ($\frac{1}{2}$ ”) y 6.3 mm ($\frac{1}{4}$ ”). Normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, no tienen función estructura y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa; permiten que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, minimizando el acuaplaneo, reduciendo la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y mejora la visibilidad del señalamiento horizontal.

Mezcla asfáltica de granulometría discontinua, tipo SMA Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre 19.0 mm ($\frac{3}{4}$ ”) y 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ ”). Normalmente se utilizan para formar capas de rodadura; tienen una elevada macrotextura, lo que evita que el agua de lluvia forme una película continua sobre la superficie del pavimento, con lo que se incrementa la fricción de las llantas; minimizan el acuaplaneo, reducen la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes, se mejora la visibilidad



del señalamiento horizontal y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura.

MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO

Son las elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales pétreos.

Mezcla asfáltica de granulometría densa. Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales pétreos, con tamaño nominal entre 37.5 mm (1½") y 9.5 mm (¾"). Normalmente se utilizan en los casos en que la intensidad del tránsito (ΣL) es igual o menor a 1 millón de ejes equivalentes, en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en donde no se requiere una alta resistencia estructural, en refuerzo de pavimentos existentes y en la reparación de baches.

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

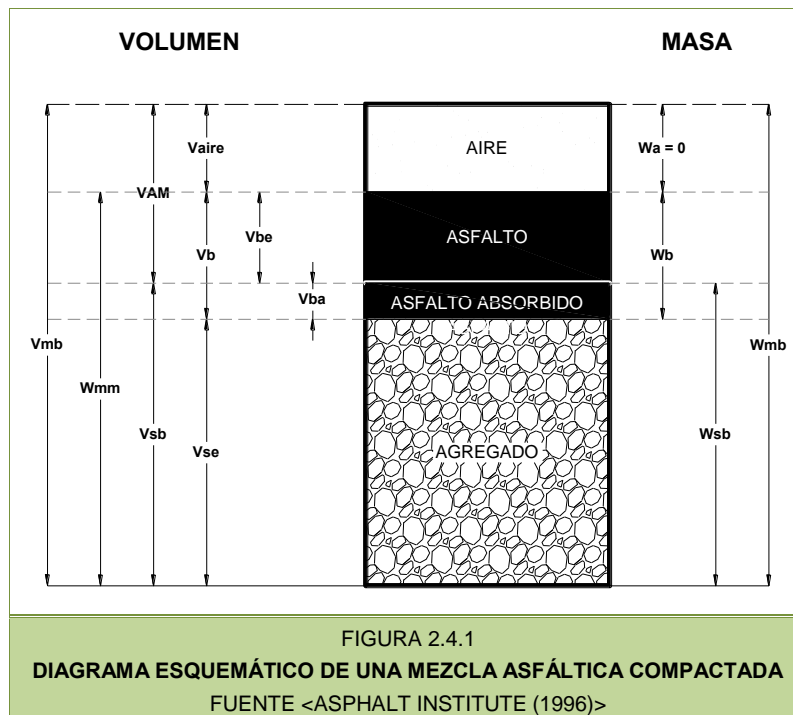
MEZCLAS ASFÁLTICAS POR SISTEMAS DE RIEGOS

Son las que se construyen mediante la aplicación de 1 ó 2 riegos de material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes. Normalmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, nueva o existente, como capa de rodadura con el objeto de proporcionar resistencia al derrapamiento y al pulimento.



2.4.2 PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

La volumetría es un factor que debe considerarse en el análisis del comportamiento de la mezcla asfáltica. El modelo para describir las propiedades de masa y de volumen de una mezcla asfáltica en caliente es el diagrama de masas, donde se considera a la mezcla con los vacíos de aire, cemento asfáltico y agregado mineral, tratados como componentes discretas (Figura 2.4.1).



Dónde:

- Vmb = volumen total de la mezcla compactada
- Vmm = volumen de la mezcla sin vacíos
- VAM = volumen de vacíos en el agregado mineral
- Vsb = volumen total del agregado
- Vse = volumen efectivo de agregado
- Vbe = volumen efectivo de asfalto
- Vba = volumen de asfalto absorbido
- Vaire = volumen de aire
- Wmb = masa total de la mezcla compactada
- Wa = masa del aire
- Wb = masa del asfalto
- Wsb = masa total del agregado

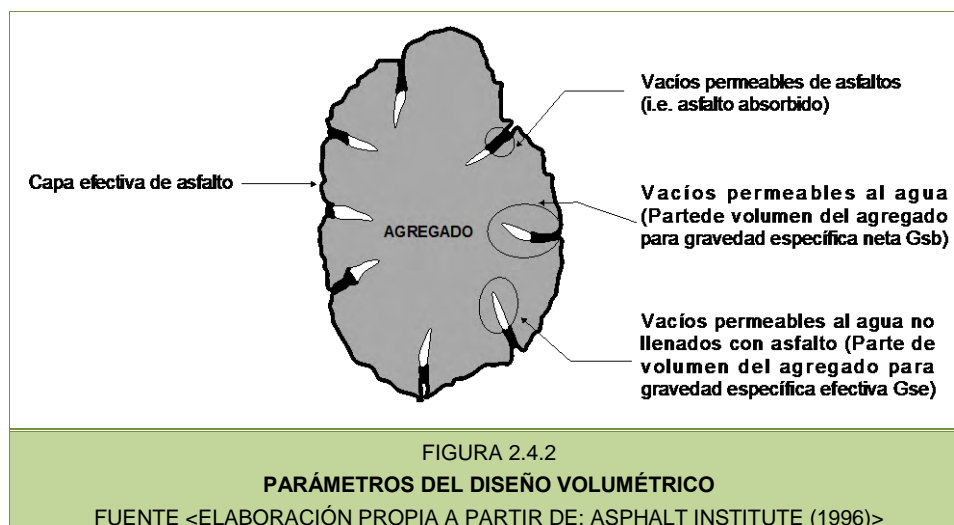


Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

Las fases de asfalto efectivo y de aire de la mezcla, se consideran como volumen de vacíos en el agregado mineral; y la fase de aire como el volumen de aire en la mezcla. Cuando los vacíos contienen únicamente asfalto ($V_a=0$), se dice que los vacíos están llenos, y se estima que la mezcla ha alcanzado su densidad máxima teórica; cuando existe tanto aire como asfalto, se considera que parte de los vacíos están llenos con asfalto, y que la mezcla ha alcanzado un determinado grado de saturación.

La mezcla asfáltica compactada debe analizarse con base en el volumen, por tanto, es importante definir y entender cada uno de los volúmenes del diagrama de fases. A continuación se presentan las definiciones, y en la Figura 2.4.2 se ilustran dichos volúmenes para una mejor comprensión.

- **Volumen de asfalto efectivo, V_{be} .** Es el volumen de asfalto que cubre las partículas de agregado; es decir, es el asfalto que no es absorbido por los poros del agregado.
- **Volumen de asfalto absorbido, V_{ba} .** Es el volumen de asfalto que es absorbido por los poros externos del agregado.
- **Volumen total del agregado, V_{sb} .** Es el volumen total del agregado que comprende el volumen del sólido y el de los poros permeables al agua.
- **Volumen efectivo del agregado, V_{se} .** Es el volumen del agregado que comprende el volumen del sólido y el de los poros permeables al agua no llenos con asfalto.
- **Volumen aparente del agregado, V_{sa} .** Es el volumen del sólido del agregado, es decir, no incluye el volumen de los poros permeables al agua.





Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

El procedimiento de diseño de mezcla, calcula los valores de VAM para las mezclas de pavimento en términos de la gravedad específica neta de los agregados, G_{sb} .

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos de aire (V_a), se expresan como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica. Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje del VAM llenado con el asfalto efectivo.

Dependiendo de cómo se especifica el contenido de asfalto, el contenido de asfalto efectivo puede ser expresado como un porcentaje de la masa total de la mezcla asfáltica o como porcentaje de la masa del agregado de la mezcla asfáltica.

Debido a que el vacío de aire, VAM y VFA son cantidades de volumen; una mezcla asfáltica, primero debe ser diseñada o analizada sobre la base del volumen. Para propósitos de diseño, este acercamiento volumétrico puede ser fácilmente cambiado a valores masa, para proveer una mezcla de diseño.



2.5 DISEÑO DE MEZCLAS

Mediante el diseño de las mezclas asfálticas se selecciona el tipo y granulometría de material pétreo que se empleará además del tipo y contenido de ligante asfáltico, actualmente son diseñadas por medio de procedimientos empíricos de laboratorio, por lo que se requieren años de experiencia para correlacionar el comportamiento del pavimento con otros trabajos de laboratorio.

A nivel Mundial ha existido la necesidad de realizar investigaciones acerca de un diseño adecuado de los pavimentos asfálticos, en México actualmente se sigue utilizando el Método Marshall.

Criterios a considerar para el diseño de mezclas:

- El espesor de la película de asfalto alrededor del pétreo, tiene una influencia determinante en la estabilidad y durabilidad. Mientras más delgada es dicha película, menor será la estabilidad. A medida que esta película se engruesa el asfalto tiende a cohesionar el pétreo, pasando por un óptimo y luego hace un efecto lubricador.
- La cohesión entre pétreos, varía con el tiempo al perder el asfalto su poder ligante y flexibilidad al oxidarse.
- El aporte del material pétreo a la estabilidad, lo efectúa a través de su fricción interna y esta a su vez, es función del tamaño del pétreo y de la rugosidad de sus caras.
- La falta de estabilidad proporcionada por los pétreos, puede ser suplida en parte, usando un asfalto de menor penetración.
- En el diseño además deben considerarse las características de impermeabilidad y trabajabilidad.
- El diseño debe encontrar el mejor balance entre estabilidad y durabilidad. El objetivo de este balance es obtener la mezcla más económica.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

Monismith, Finn, Vallergera (1996), resumieron en una lista las propiedades que deben considerarse en el diseño de la mezcla asfáltica, así como los factores que influyen en ellas (Tabla 2.5.1).

PROPIEDAD	DEFINICIÓN	VARIABLES QUE PUEDEN INFLUIR
RIGIDEZ	Relación entre tensión y deformación a una temperatura y tiempo de carga dados.	<ul style="list-style-type: none"> • Granulometría del material pétreo • Rigidez del asfalto • Grado de compactación • Sensibilidad a la humedad
ESTABILIDAD	Resistencia a la deformación permanente (generalmente a altas temperaturas y largos periodos de aplicación de carga).	<ul style="list-style-type: none"> • Textura superficial del material pétreo • Granulometría del material pétreo • Rigidez del asfalto • Contenido de asfalto • Grado de compactación • Sensibilidad a la humedad
DURABILIDAD	Resistencia a los efectos climáticos (aire y agua) y a la acción abrasiva del tráfico.	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de asfalto • Naturaleza del asfalto • Granulometría del material pétreo • Grado de compactación • Sensibilidad a la humedad
RESISTENCIA A LA FATIGA	Habilidad de la mezcla a flexionar repetidamente sin romperse.	<ul style="list-style-type: none"> • Granulometría del material pétreo • Contenido de asfalto • Grado de compactación • Rigidez del asfalto • Sensibilidad a la humedad
CARACTERÍSTICAS DE FRACTURA	Resistencia de la mezcla a la fisuración por tensiones de tracción.	<ul style="list-style-type: none"> • Granulometría del material pétreo • Tipo de material pétreo • Contenido de asfalto • Grado de compactación • Rigidez del asfalto • Sensibilidad a la humedad
RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	Capacidad de la mezcla para proveer un adecuado coeficiente de fricción entre el neumático y el pavimento bajo condiciones húmedas.	<ul style="list-style-type: none"> • Textura y resistencia al pulimento del material pétreo • Granulometría del material pétreo • Contenido de asfalto
PERMEABILIDAD	Capacidad del aire, agua o vapor de agua para moverse dentro y a través de la mezcla.	<ul style="list-style-type: none"> • Granulometría del material pétreo • Contenido de asfalto • Grado de compactación

TABLA 2.5.1
PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS
FUENTE <MONISMITH, FINN, VALLERGERA (1996)>



2.5.1 DISEÑO MARSHALL

Éste método es uno de los más conocidos y utilizados para la dosificación de las mezclas asfálticas, fue desarrollado por el Ing. Bruce Marshall, posteriormente fue mejorado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, elaborando un criterio del diseño de mezclas.

El método Marshall es aplicable solo a mezclas en caliente con cementos asfálticos que contengan agregados con tamaño máximo igual o inferior a 25 mm. El método puede usarse tanto para el diseño en laboratorio como en el control de calidad en campo.

Con el Ensayo Marshall, es posible obtener el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados pétreos, que garantice una buena estabilidad y recubrimiento de las partículas.

Debido a que los datos obtenidos del diseño de la mezcla determinan el comportamiento adecuado de la mezcla de pavimentación, las muestras de asfalto y material pétreo deben tener características idénticas a los materiales que se utilizarán en la mezcla final.

El método Marshall utiliza probetas normalizadas de 4" de diámetro y 2.5" de espesor. Se fabrican una serie de probetas con la misma combinación de agregados pétreos pero con distintos contenidos de asfalto.

Se deben conocer las relaciones viscosidad – temperatura del asfalto para poder establecer las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica, además de seleccionarse la granulometría que se empleará en la fabricación de las mezclas.

Una vez que se ha seleccionado la granulometría y tipo de asfalto a utilizar, se fabricarán las probetas de 4" con distintas variaciones del contenido asfáltico, realizando por lo menos 2 probetas para cada ensayo.

Se calientan y se mezclan los agregados pétreos y el asfalto, de manera que todas las partículas queden cubiertas, posteriormente se coloca la mezcla en los moldes Marshall, los cuales deben haber sido pre – calentados. La mezcla es compactada mediante el Martillo



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

Marshall (Figura 2.5.1), aplicando los golpes recomendados por la Norma de la SCT en cada una de las caras para el tránsito que está siendo diseñada la mezcla (50 ó 75 golpes por cara).

Una vez que se enfrían las probetas, son desmontadas, se determina su densidad y relación de vacíos, para posteriormente someterlas a un ensayo a rotura en la prensa Marshall para calcular su estabilidad y flujo.

Se colocan las probetas en un baño María a 60 ± 1 °C durante un mínimo de 30 minutos, se remueve la probeta del baño María, se seca cuidadosa y rápidamente, se coloca y centra en la mordaza inferior, se coloca la mordaza superior y se centra completamente en la Prensa Marshall (Figura 2.5.1).



FIGURA 2.5.1
PEDESTAL DE COMPACTACIÓN Y MÁQUINA DE ENSAYO MARSHALL



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51 mm por minuto, hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida.

El número total de Newtons (N) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de mm será el valor del flujo Marshall.

Las mezclas que tienen altos valores de estabilidad Marshall y bajos valores de flujo son consideradas demasiado frágiles y rígidas.

Las mezclas asfálticas elaboradas mediante el método Marshall deben cumplir con los requisitos establecidos en las Tablas 2.5.2 y 2.5.3.

CARACTERÍSTICAS	NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO $\sum L$ ^[1]	
	$(\sum L_{10}) \leq 10^6$	$10^6 \geq \sum L_{10} \leq 10^7$
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb _f), mínimo	5,340 (1,200)	8,000 (1,800)
Flujo; mm (10-2 in)	2 – 4 (8 – 16)	2 – 3.5 (8 – 14)
Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC); %	3 – 5	3 – 5
Vacíos ocupados por el asfalto (VFA); %	65 – 78	65 – 75

[1] $\sum L_{10}$ = Número de ejes equivalentes de 8.2 ton (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Para tránsitos mayores de 10^7 ejes equivalentes de 8.2 ton, se requiere diseño especial de la mezcla.

TABLA 2.5.2
**REQUISITOS DE CALIDAD PARA MEZCLAS DE GRANULOMETRÍA DENSA,
DISEÑADAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL**

FUENTE <NORMA N·CMT·4·05·003/08>

Para poder analizar las características particulares de cada probeta fabricada una vez que se han realizado todos los ensayos se elaboran las gráficas de porcentaje de vacíos, de los porcentajes de vacíos en el agregado mineral (VAM), del porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA), de las densidades, de los valores de estabilidad Marshall y del flujo.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

TAMAÑO NOMINAL DEL MATERIAL PÉTREO UTILIZADO EN LA MEZCLA ^[1]		VACÍOS EN LA MEZCLA (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 N-CMT-4-04, Materiales Pétreos para Mezclas asfálticas, para el tipo de granulometría del material pétreo utilizado en la mezcla.

TABLA 2.5.3
**VACÍOS DEL AGREGADO MINERAL (VAM) PARA MEZCLAS
DE GRANULOMETRÍA DENSA, DISEÑADAS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL**
FUENTE <NORMA N-CMT-4-05-003/08>

El contenido de diseño de asfalto en la mezcla asfáltica final se determina a partir de los resultados obtenidos y de las tendencias entre el contenido del asfalto y las propiedades de la mezcla.



2.5.2 DISEÑO SUPERPAVE

Entre los años de 1987 y 1993 el Strategic Highway Research Program (SHRP) "Programa Estratégico de Investigación de Carreteras", realizó un proyecto de investigación para desarrollar nuevas formas de ensayo y especificaciones para ligantes asfálticos. El resultado de éste proyecto fue el sistema conocido como Superior Performing Asphalt Pavement (SUPERPAVE) "Pavimentos Asfálticos de Comportamiento Superior".

SUPERPAVE representa un sistema mejorado para especificar ligantes asfálticos, agregados minerales, diseño de mezclas y predicciones del comportamiento de la misma, el cual involucra procedimientos para la selección cuidadosa de materiales y el proporcionamiento volumétrico de los mismos.

SUPERPAVE está compuesto por tres niveles:

PRIMER NIVEL

Éste nivel requiere del Diseño Volumétrico de la Mezcla. Lo cual involucra:

1. Selección del tipo de asfalto. Basándose en su grado PG.
2. Selección de las propiedades de los agregados. Considerando la angularidad del agregado grueso, la angularidad del agregado fino, las partículas alargadas y lajeadas, así como el contenido de arcilla.
3. La fabricación de especímenes de ensayo. Elaboradas mediante el compactador giratorio SUPERPAVE (SGC).
4. La selección del contenido de asfalto.

Esta actividad esta basada en la estimación del contenido de vacíos en la mezcla, vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA), relación filler / asfalto y su contenido efectivo de asfalto.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

NIVEL INTERMEDIO

Utiliza como punto de partida los análisis volumétricos del primer nivel, por lo cual este juega un papel clave en el sistema de análisis y diseño SUPERPAVE, además se realizan ensayos de predicción del comportamiento. Los ensayos establecidos para el nivel intermedio son:

- Ensayos de Corte SUPERPAVE “Superpave Shear Test” (SST)
- Ensayos de Tracción Indirecta “Indirect Tensile Test” (IDT)

Una cantidad de ensayos utilizando equipos SST e IDT, son realizados para lograr una serie de predicciones del comportamiento de la mezcla. Los resultados de estos ensayos se utilizan como datos de entrada para determinar las propiedades de elasticidad no – lineal, viscoelasticidad, plasticidad y fractura.

NIVEL AVANZADO

Comprende la totalidad de los pasos del análisis intermedio. En este nivel se realizan pruebas adicionales SST e IDT a una amplia variedad de temperaturas. El análisis completo de una mezcla utiliza especímenes confinados SST, y ofrece un mayor y más confiable nivel de predicción del comportamiento de la misma.

ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES INTERMEDIO Y AVANZADO

Estos ensayos en el diseño de mezclas y el sistema de análisis SUPERPAVE solo se utilizan en situaciones de tránsito moderado a alto. Los ensayos utilizan nuevos procedimientos y equipos para garantizar que las mezclas asfálticas cuenten con los valores mínimos para los tipos de deterioros considerados por los investigadores de SHRP: deformación permanente, fisuración por fatiga y fisuración por baja temperatura. En la tabla 2.5.4 se pueden observar los ensayos de comportamiento para ambos niveles.



Capítulo 2. Mezclas Asfálticas

NIVELES DE DISEÑO	MODOS DE DETERIORO		
	DEFORMACIÓN PERMANENTE ¹	FISURAMIENTO POR FATIGA	FISURAMIENTO POR BAJA TEMPERATURA
INTEMEDIO	<p>Ensayo de corte simple a altura constante a T_{eff} (PD).</p> <p>Ensayo de barrido de frecuencias a altura constante a T_{eff} (PD)</p>	<p>Ensayo de corte simple a altura constante a T_{eff} (FC).</p> <p>Ensayos de barrido de frecuencias a altura constante a T_{eff} (FC).</p> <p>Ensayo de tracción indirecta a T_{eff} (FC).</p>	<p>Creep compliance en tracción indirecta (0, -10, -20°C).</p> <p>Resistencia de tracción indirecta a -10°C.</p> <p>Creep stiffness (S) y velocidad de creep (m).</p>
AVANZADO	<p>Ensayo de deformación específica uniaxial (4, 20, 40° C).</p> <p>Ensayo volumétrico (4, 20, 40° C).</p> <p>Ensayo de corte simple a altura constante (4, 20, 40° C).</p>	<p>Resistencia a la tracción indirecta (-10, 4, 20° C)</p>	<p>Ensayo de barrido de frecuencias a altura constante (4, 20, 40° C)</p> <p>Creep compliance y resistencia en tracción indirecta (0, -10, -20°C).</p>

¹ Para verificar la fluencia terciaria, los Niveles Intermedio y Avanzado requieren ensayo de corte repetido a relación de la tensión constante T_c .

TABLA 2.5.4
ENSAYOS SUPERPAVE DE DESEMPEÑO PARA LOS NIVELES INTERMEDIO Y AVANZADO
FUENTE <ASPHALT INSTITUTE>

CAPÍTULO 3

DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS





CAPÍTULO 3

DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1 INTRODUCCIÓN

El Pavimento debe soportar las cargas inducidas por los vehículos, su comportamiento depende significativamente de las condiciones climáticas. En climas cálidos algunos pavimentos asfálticos fluyen bajo cargas repetidas y forman ahuellamientos, esto se debe a que las mezclas asfálticas tienen un comportamiento plástico y una vez que empiezan a deformarse no regresan a su posición original. Aunque los cambios sufridos en la superficie del pavimento por el exceso de cargas no son percibidos inmediatamente por el usuario, ya que se va dando de forma acumulativa, pasando de una deformación elástica a una deformación plástica, si influyen en su seguridad y costos de operación.



3.2 DEFORMACIONES PERMANENTES

Cuando una mezcla asfáltica no tiene la suficiente capacidad para resistir las cargas ejercidas por los vehículos pesados, puede ir acumulando pequeñas deformaciones, estas van produciendo una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla, (Figura 3.2.1). La carga de la rueda sobre la superficie del pavimento es aplicada en un área muy reducida, lo que causa grandes tensiones en la estructura.

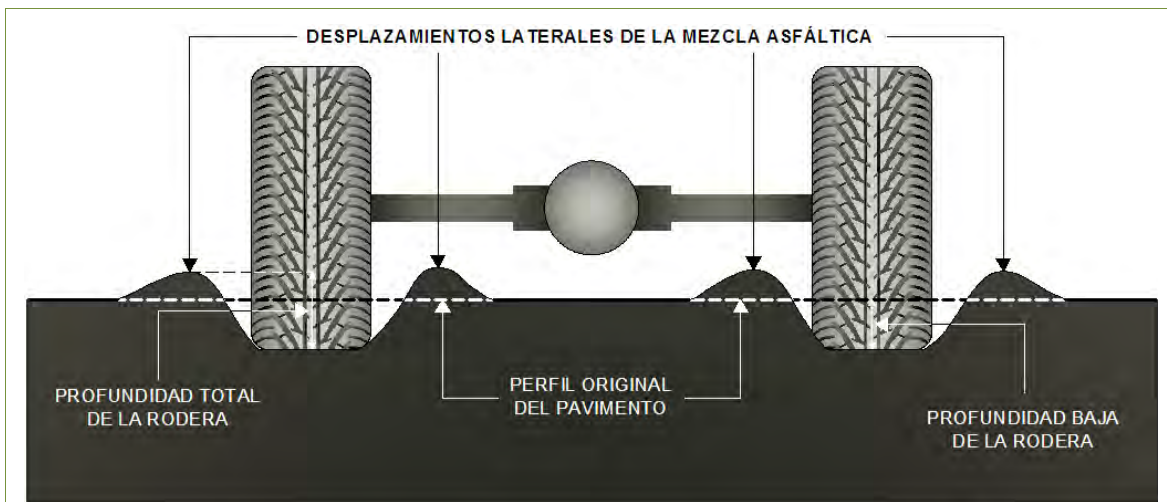


FIGURA 3.2.1

DEFINICIÓN DE AHUELLAMIENTO TOTAL

FUENTE: <ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE: WWW.TFHRC.GOV>

De acuerdo a Brown y Cross (1992), las deformaciones permanentes se presentan en los primeros 7 a 10 cm de mezcla asfáltica más cercanos a la superficie. Además indican que el contenido de vacíos es el factor que más influye en la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla asfáltica, seguido del contenido y grado asfáltico.

De acuerdo al Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica (2002), la profundidad máxima de una rodadura, medida a partir de una regla transversal a cada 100 m o más se clasifica en:

- Ligera < 2 cm.
- Media ≥ 2 cm y < 4 cm.
- Fuerte ≥ 4 cm.



Otros autores clasifican la severidad del ahuellamiento como:

- **Leve.** De $\frac{1}{4}$ " a menos de $\frac{1}{2}$ " de profundidad.
- **Moderado.** De $\frac{1}{2}$ " a menos de 1" de profundidad.
- **Severo.** Mayor a 1" profundidad.

La acumulación de agua en las roderas provoca efectos como el hidroplaneo, el cual consiste en la presencia de una película de agua en la superficie del pavimento y debido a esta los neumáticos del vehículo no están en contacto directo con él, puede provocar que la circulación del vehículo en la carretera a altas velocidades se vuelva peligrosa, ya que el conductor pierde parcial o totalmente el control de éste.

El hidroplaneo no solo se adjudica a las deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas, también puede deberse al desgaste de los neumáticos, a que el espesor de la película de agua es elevado debido a una mala capacidad del pavimento para evacuarla, o a la circulación a altas velocidades de los vehículos en la presencia de agua en la superficie del pavimento.

En la Figura 3.2.2 se ilustra un perfil transversal común con roderas, donde existe una arista que separa las rodadas de los vehículos, sin embargo, en algunos casos esta arista no existe, dejando un perfil transversal con una sola depresión ancha. La profundidad de la rodera se determina usando el principio de la medida del alambre.

Se calculan las profundidades de las roderas de izquierda y derecha del carril, así como la profundidad máxima de ambas roderas, (Figura 3.2.3).

La profundidad de rodera se calcula a partir de la medida del perfil transversal y el valor medio de las profundidades de las roderas calculadas a partir de Perfiles transversales individuales, definidos anteriormente; se puede dar además una distancia elegida por el usuario, normalmente 20 m.



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

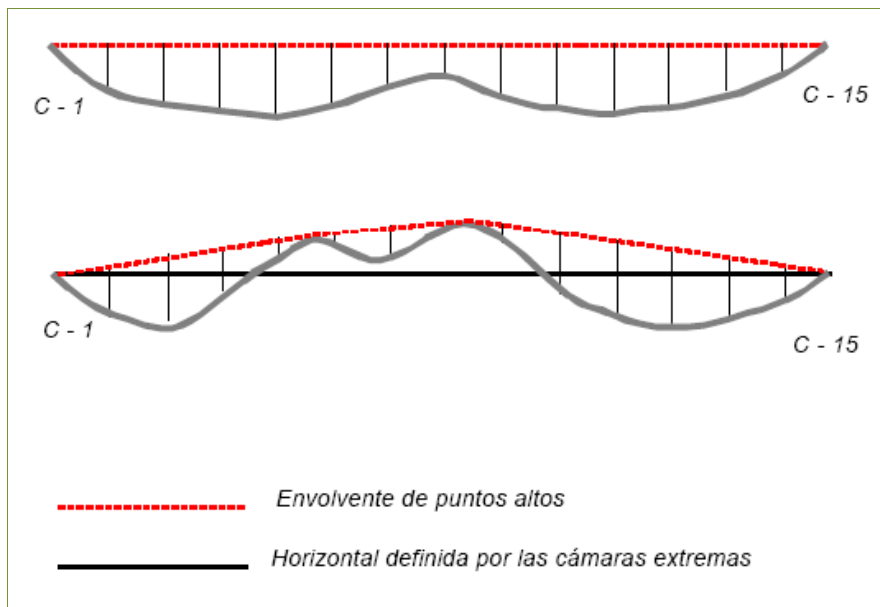


FIGURA 3.2.2
CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE LA RODERA POR EL MÉTODO DEL ALAMBRE
FUENTE <CRESPO (1998)>

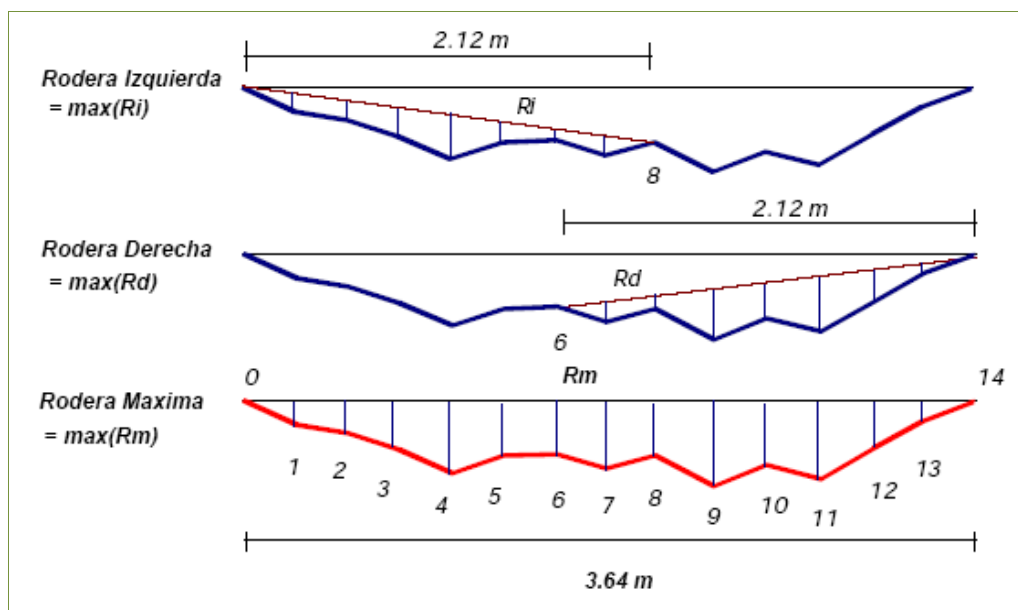


FIGURA 3.2.3
CÁLCULO DE LAS RODERAS
FUENTE <CRESPO (1998)>



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

Aunque actualmente en nuestro país se construyan autopistas con mejores especificaciones, gran parte del transporte de carga sigue utilizando las carreteras libres de peaje, un ejemplo de ello es la carretera México – Guadalajara. En la localidad de Atotonilquillo en el Municipio de Chapala, Jalisco (del km 11+350 al 12+000), se pudo observar claramente un ejemplo de deformaciones permanentes debidas a una baja estabilidad de la mezcla y exceso de cargas del tráfico en la carretera (Figuras 3.2.4 y 3.2.5).

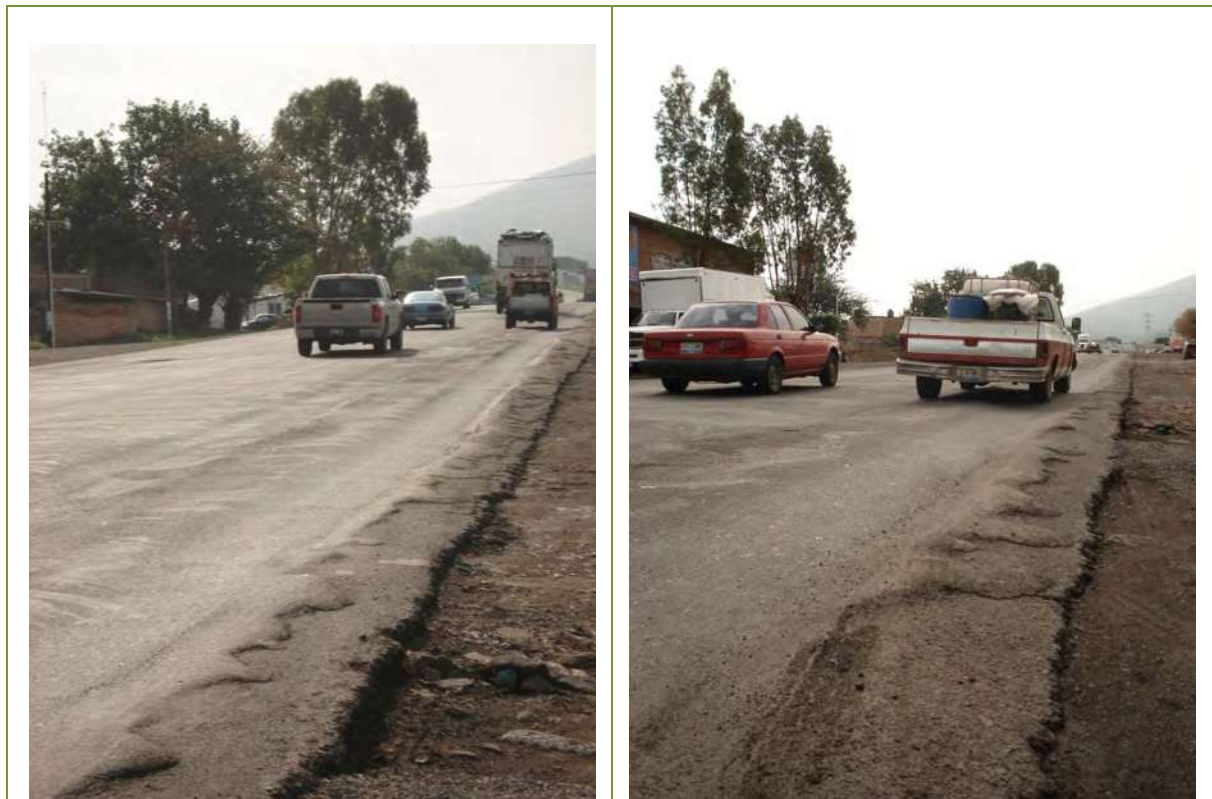


FIGURA 3.2.4
CARRETERA FEDERAL No. 35, CHAPALA – LA BARCA, KM 11+400

Éste tramo fue reencarpetado durante la época de lluvias (Mayo de 2007), 12 meses después se pudo observar lo anterior.

Si se considera que la utilización de las autopistas reduce el deterioro de los vehículos, contribuye al ahorro de combustible, reduce el tiempo de traslado y sobre todo que se minimizan en gran medida los deterioros que se presentan en nuestras carreteras, podrían



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

reducirse los costos de reconstrucción de algunos tramos, además de la garantizar una mejor seguridad de los usuarios, ya que las dimensiones actuales de los vehículos de carga y las características con las cuales fueron diseñadas las carreteras hacen que la circulación sea complicada, lo que puede ocasionar accidentes en ellas.



FIGURA 3.2.5

CARRETERA FEDERAL No. 35, CHAPALA – LA BARCA, KM 11+700



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

Además de los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares, en el pavimento se producen esfuerzos producidos por la aceleración y frenado de los vehículos, generalmente esto sucede en las zonas urbanas con topes o semáforos.

En las figuras 3.2.6, 3.2.7, 3.2.8, 3.2.9 y 3.2.10 se pueden observar las deformaciones permanentes producidas en la mezcla asfáltica debido a esfuerzos de aceleración y desaceleración en zonas de baja circulación en la ciudad de Morelia, Michoacán.



FIGURA 3.2.6

CARRILES LATERALES EN AMBOS SENTIDOS DE LA CALZADA JUÁREZ, EN LA CIUDAD DE MORELIA



FIGURA 3.2.7

DEFORMACIONES EN EL LIBRAMIENTO EN LA CIUDAD DE MORELIA (MERCADO DE ABASTOS)



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas



FIGURA 3.2.8

DEFORMACIONES EN EL LIBRAMIENTO EN LA CIUDAD DE MORELIA (POLICIA Y TRÁNSITO)



FIGURA 3.2.9

DEFORMACIONES EN LA LATERAL DEL LIBRAMIENTO EN LA CIUDAD DE MORELIA (PLAZA LAS AMÉRICAS)



FIGURA 3.2.10

DEFORMACIONES EN EL CRUCERO DE LA SALIDA A QUIROGA EN LA CIUDAD DE MORELIA



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

Los problemas que puede ocasionar el ahuellamiento son:

- Pérdida de integridad estructural.
- Hidroplaneo.
- Irregularidad superficial.
- Infiltración de agua en grietas.
- Exudación de asfalto.
- Pérdida de resistencia al deslizamiento

Algunas de sus acciones correctivas pueden ser:

- Nivelación y repavimentación.
- Rencarpetado no estructural.
- Rencarpetado estructural en casos severos.
- Reconstrucción.
- Reciclado.



3.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS DEFORMACIONES PERMANENTES

La presencia de las roderas en la superficie de un pavimento es consecuencia de las deformaciones plásticas debido a una baja estabilidad en la mezcla asfáltica, la cual depende fundamentalmente de:

- Granulometría y características del material pétreo
- Contenido de vacíos
- El tipo y contenido de ligante asfáltico
- Cargas del tráfico
- Temperatura de servicio
- Control de calidad durante su construcción

3.3.1 GRANULOMETRÍA Y CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PÉTREO

Diversos estudios respaldan el concepto de que una mezcla densa con granulometría continua tiene un mejor comportamiento a las deformaciones permanentes, esto se debe a que existe un mejor acomodo de las partículas y por lo tanto son mezclas que contienen de un 3% a un 5% de vacíos.

Debido a la fricción interna entre las partículas del material pétreo dentro de la mezcla asfáltica, se ha observado que los pétreos producto de la trituración con texturas rugosas tienen un mejor comportamiento en la mezcla asfáltica, favoreciendo la resistencia a la deformación permanente.

3.3.2 CONTENIDO DE VACÍOS

De acuerdo a Brown y Cross (1989), una de las principales causas del ahuellamiento es el bajo contenido de vacíos en la mezcla. Además, es posible que esta relación se vea



afectada una vez que comienza la depresión del ahuellamiento. Recomiendan tener entre un 3 y 5% de vacíos. Determinaron que el ahuellamiento significativo se produce cuando las capas contienen menos del 3% de vacíos de aire. Este porcentaje de vacíos no debe tratar de alcanzarse adicionando asfalto a la mezcla, ya que de ser así la mezcla asfáltica se vuelve más susceptible a presentar una deformación permanente.

Además debe considerarse que el porcentaje de vacíos disminuye una vez que la mezcla asfáltica está en servicio y es posible que la deformación permanente se presente debido a la consolidación a corto plazo de la mezcla (vacíos de aire muy altos o muy bajos).

3.3.3 TIPO Y CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO

Debido al comportamiento del asfalto a altas temperaturas, su viscosidad es de fundamental importancia en la mezcla asfáltica. Al contar con un asfalto más viscoso (más duro) se puede tener una mayor resistencia a la deformación permanente, sin embargo, se debe considerar que un asfalto demasiado viscoso tiene un mal comportamiento a bajas temperaturas, pudiendo originarse un agrietamiento por fatiga.

El tipo de asfalto puede influir decisivamente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica en caliente. En una mezcla que contenga la misma granulometría y el mismo tipo de agregados pétreos, con un mismo contenido de asfalto e igual contenido de vacíos, puede ser resistente o no a las deformaciones plásticas en función de las propiedades del ligante asfáltico que se le añade a la mezcla aunque sea de similar penetración (Padilla, 2004).

Como se mencionó anteriormente, los asfaltos modificados mejoran el comportamiento de la mezcla asfáltica, favoreciendo de manera significativa su resistencia a la deformación permanente.

Además Brown y Cross (1989) determinaron que una de las causas de que exista un ahuellamiento excesivo es el alto contenido de asfalto en las mezclas, ya que la mezcla cuenta con un menor % de vacíos.



3.3.4 CARGAS DEL TRÁFICO

El exceso de cargas en la estructura del pavimento influye considerablemente en la acumulación de las deformaciones en la mezcla asfáltica. Las cargas son transmitidas del vehículo a los neumáticos y posteriormente a la estructura del pavimento.

El hecho de someter a un mayor número de repeticiones a la estructura del pavimento, ocasionará que la deformación permanente de la mezcla asfáltica se presente con mayor rapidez, es por ello que los ensayos de simulación se realizan para determinado número de ciclos de carga.

Además la velocidad de la aplicación de la carga influye considerablemente en la generación de las deformaciones permanentes, está directamente relacionada con las distintas pendientes que se presentan en la carretera, así como en las dimensiones y peso de los vehículos.

3.3.5 GEOMETRÍA DE LA CARRETERA

La pendiente del camino hace que los vehículos transiten a menor velocidad, produciendo con ello una aplicación más lenta de la carga, ocasionando de forma más rápida la deformación permanente de la superficie de rodamiento.

3.3.6 TEMPERATURA DE SERVICIO

El efecto de la alta temperatura en la superficie del pavimento juega un papel primordial en la susceptibilidad de la mezcla a sufrir acumulación de deformaciones, las cuales suelen aparecer entre la primavera-verano, cuando las temperaturas son más elevadas que en el resto del año.



3.3.7 CONTROL DE CALIDAD DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

Es importante que al momento de darse la compactación en campo se asegure de que ésta se realice con la energía necesaria, ya que al no realizarse adecuadamente se pueden tener mezclas con vacíos superiores al 8%, lo que ocasionaría un problema severo y la mezcla sería susceptible a tener problemas de deformación permanente.

El hecho de realizar diseños de mezclas y ensayos de laboratorio, no garantiza que la carpeta asfáltica tenga un buen comportamiento, ya que al trasladar estos resultados a campo pueden existir variaciones en la granulometría empleada, cambios debidos al proceso de mezclado, etc., además, se ha observado que en algunos casos cuando se han hecho diseños utilizando algún modificador del asfalto, al momento de realizarse la obra, la mezcla no tiene la dosificación adecuada de aditivo, o inclusive, no cuenta con éste.

Es por esto que se debe cuidar la calidad de los materiales empleados para la elaboración de las mezclas asfálticas así como su proceso constructivo.



3.4 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES

De acuerdo con Crespo (1998), un tramo de carretera se clasifica utilizando el valor medio de la rodera máxima expresada en milímetros y los niveles establecidos:

- Bueno < 10 mm.
- Aceptable 10 a 15 mm.
- No deseable > 15 mm.

En la actualidad existen diversos ensayos para determinar las deformaciones plásticas, dentro de los cuales se pueden mencionar los siguientes:

3.4.1 EQUIPOS EN CAMPO

Existen los perfilógrafos transversales, con los cuales se obtienen los perfiles detallados de secciones transversales de las carreteras, los datos son graficados automáticamente y se muestra la deformación permanente que ha sufrido la carpeta asfáltica.

Para la medición de la regularidad transversal suelen emplearse reglas fijas de 3 m o los modernos transverso – perfilógrafos de función múltiple, son equipos dotados de varios láseres montados sobre una barra transversal a la dirección del vehículo, los cuales tienen un alto rendimiento.

PERFILÓMETROS

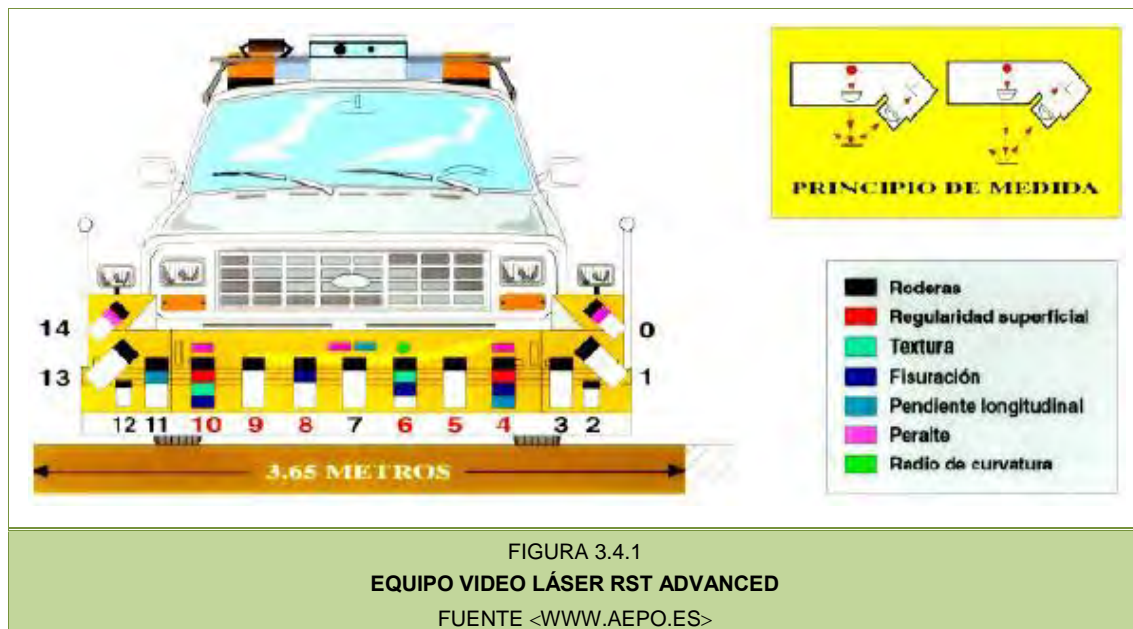
La regularidad superficial es una de las características básicas del estado del pavimento, se mide a través del análisis del perfil longitudinal.

El perfil longitudinal se define por las variaciones relativas en altura de la superficie de la carretera en dirección longitudinal, es decir en la dirección del movimiento de los vehículos, también puede definirse como el conjunto de desniveles e irregularidades de la carretera.



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

El **Video Laser RST** (Figura 3.4.1), usa normalmente las 15 cámaras láser, pero las roderas se pueden calcular usando entre 3 y 13 cámaras láser, éste equipo no solo obtiene las roderas, sino el perfil transversal definido por 15 puntos (los dos extremos de cota cero).



El **Perfilómetro Superficial de Pavimentos “RSP”** (Figura 3.4.2), produce medidas continuas a velocidades de autopistas, de los perfiles longitudinales y transversales, incluyendo la rugosidad superficial en tiempo real (IRI y Ride Number), el ahuellamiento y la evaluación de la textura, el GPS, y la geometría (pendiente transversal, el ángulo y la curvatura).

En el equipo un acelerómetro es usado para obtener el movimiento vertical del vehículo, y un sensor láser es usado para medir el desplazamiento relativo entre el vehículo y la superficie del pavimento. Las mediciones del perfil son obtenidas al sumar el desplazamiento entre el vehículo y la superficie. El IRI es calculado de acuerdo a especificaciones del Banco Mundial.



El perfil transversal y/o el ahuellamiento son medidos por un mínimo de 3, y hasta un máximo de 21 sensores láser que están en la barra delantera. Se puede agregar un sensor de movimiento inercial para poder medir la pendiente transversal, el ángulo y la curvatura.



FIGURA 3.4.2
PERFILÓMETRO DYNATESTS MARK II
FUENTE-<WWW.DYNATEST.COM>

3.4.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

La idea de la realización de ensayos en laboratorio es que estos simulen las condiciones a las que puede estar sometido el pavimento. En el caso de las mezclas asfálticas, existen varios ensayos con los que se puede analizar la susceptibilidad a la deformación permanente, entre estos ensayo tenemos:

- Ensayos cortantes.
- Ensayos diametrales.
- Ensayos empíricos.
- Ensayos uniaxiales.
- Ensayos triaxiales.
- Ensayos de simulación.

A continuación se mencionarán las características de algunos de estos ensayos, así como las ventajas y desventajas de utilizarlos.



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

ENSAYOS DIAMETRALES

Debido a que son ensayos a tensión, no son los más adecuados para la evaluación de las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Por lo tanto no deben ser considerados como una primera opción.

MÉTODO DEL ENSAYO	DIMENSIÓN DE LA PROBETA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Diametral estático (fluencia)	Diámetro = 4" Altura = 2.5"	<ul style="list-style-type: none"> Se puede realizar el ensayo fácilmente. El equipo generalmente está disponible en muchos laboratorios. Las probetas son fáciles de fabricar. 	<ul style="list-style-type: none"> El estado de esfuerzos no es uniforme y depende de la forma de la probeta. Puede ser inapropiada para la determinación de las deformaciones permanentes. A alta temperatura de carga existen cambios en la forma de la probeta y afecta el estado de esfuerzos y las medidas significativas del ensayo. Se encontró que existe una sobreestimación de las deformaciones permanentes. Para la prueba dinámica, el equipo es muy complejo.
Carga diametral repetida	Diámetro = 4" Altura = 2.5"	<ul style="list-style-type: none"> Se puede realizar el ensayo fácilmente. Las probetas son fáciles de fabricar. 	
Módulo dinámico diametral	Diámetro = 4" Altura = 2.5"	<ul style="list-style-type: none"> Las probetas son fáciles de fabricar. Ensayos no destructivos. 	
Resistencia diametral	Diámetro = 4" Altura = 2.5"	<ul style="list-style-type: none"> Se puede realizar el ensayo fácilmente y su duración es corta. El equipo de prueba es simple y está disponible en muchos laboratorios. Las probetas son fáciles de fabricar. El tiempo de la prueba es corto. 	

TABLA 3.4.1
**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS ENSAYOS DIAMETRÁLES PARA EVALUAR LA
SUCEPTIBILIDAD DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS SFÁLTICAS**

FUENTE: < BROWN, KANDHALM JINGNA, (2001).>



ENSAYOS UNIAXIALES

Existen pocas pruebas que relacionen los resultados obtenidos en laboratorio con los obtenidos en campo.

MÉTODO DEL ENSAYO	DIMENSIÓN DE LA PROBETA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Uniaxial Estático (Fluencia)	Diámetro = 4" Altura = 8" y otros.	<ul style="list-style-type: none"> Se puede realizar el ensayo fácilmente. El equipo generalmente está disponible en muchos laboratorios. El ensayo es conocido y existe información técnica. 	<ul style="list-style-type: none"> La predicción del comportamiento es cuestionable. Se restringe la temperatura del ensayo y los niveles de carga no simulan las condiciones reales en campo. Es difícil obtener probetas con relación 2:1 en el laboratorio.
Uniaxial con Carga Repetida	Diámetro = 4" Altura = 8" y otros.	<ul style="list-style-type: none"> Mejor simulación en las condiciones del tráfico. 	<ul style="list-style-type: none"> Equipo complejo. La temperatura de ensayo y los niveles de carga no simulan las condiciones de campo. Es difícil obtener probetas en laboratorio con relación 2:1.
Uniaxial con Módulo Dinámico	Diámetro = 4" Altura = 8" y otros.	<ul style="list-style-type: none"> Ensayos no destructivos. 	<ul style="list-style-type: none"> Equipo complejo. Es difícil obtener probetas en laboratorio con relación 2:1.
Resistencia Uniaxial	Diámetro = 4" Altura = 8" y otros.	<ul style="list-style-type: none"> Se puede realizar el ensayo fácilmente y su duración es corta. El equipo generalmente está disponible en muchos laboratorios. 	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad cuestionable para predecir la deformación permanente.

TABLA 3.4.2
**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS ENSAYOS UNIAXIALES PARA EVALUAR LA
SUCEPTIBILIDAD DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS SFÁLTICAS.**

FUENTE: < BROWN, KANDHALM JINGNA, (2001).>



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

ENSAYOS TRIAXIALES

En estos ensayos existe un confinamiento constante, en el cual se somete a los materiales asfálticos que conforman la estructura del pavimento a condiciones de esfuerzos similares a los producidos por el paso de vehículos en la superficie del pavimento, además proporciona una temperatura y presión similar a la del lugar, llevando a las probetas a una falla a corto tiempo.

MÉTODO DEL ENSAYO	DIMENSIÓN DE LA PROBETA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Triaxial Estático (Creep confinado)	Diámetro = 4" Altura = 8" Y otros.	<ul style="list-style-type: none"> Se puede realizar el ensayo fácilmente, además de ser económico. La temperatura del ensayo y los niveles de carga simulan mejor las condiciones de campo que las pruebas no confinadas. 	<ul style="list-style-type: none"> No simula el fenómeno dinámico real. Se restringe la temperatura del ensayo y los niveles de carga no simulan las condiciones reales en campo. Es difícil obtener probetas con relación 2:1 en el laboratorio.
Triaxial con Carga Repetida	Diámetro = 4" Altura = 8" Y otros.	<ul style="list-style-type: none"> La temperatura del ensayo y los niveles de carga simulan mejor las condiciones de campo que las pruebas no confinadas. 	<ul style="list-style-type: none"> Equipo complejo. La temperatura de ensayo y los niveles de carga no simulan las condiciones de campo. Es difícil obtener probetas en laboratorio con relación 2:1.
Triaxial con Módulo Dinámico	Diámetro = 4" Altura = 8" Y otros.	<ul style="list-style-type: none"> Provee la información de entrada necesaria para un análisis estructural. Ensayos no destructivos. 	<ul style="list-style-type: none"> El sistema de prueba es complejo para altas temperaturas (necesita sensibilidad para la medición de pequeñas deformaciones a altas temperaturas). El equipo es un poco complejo y caro.
Resistencia Triaxial	Diámetro = 4" ó 6" Altura = 8" Y otros.	<ul style="list-style-type: none"> Se puede realizar el ensayo fácilmente y su duración es corta. 	<ul style="list-style-type: none"> Capacidad cuestionable para predecir la deformación permanente.

TABLA 3.4.3
**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS ENSAYOS TRIAXIALES PARA EVALUAR LA
SUCEPTIBILIDAD DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS SFÁLTICAS**

FUENTE: < BROWN, KANDHALM JINGNA, (2001).>



ENSAYOS DE SIMULACIÓN

Son utilizados para la predicción de las deformaciones permanentes, obteniéndose resultados muy aproximados a la realidad.

MÉTODO DEL ENSAYO	DIMENSIÓN DE LA PROBETA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA)	Diámetro = 6" Altura = 3.5" ó 4.5" o vigas.	<ul style="list-style-type: none"> • Simula las condiciones de tránsito y temperatura. • Funcionamiento simple. • Pueden ser ensayadas de 3 a 6 probetas al mismo tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altamente costoso.
Wheel – Tracking Hamburgo	Diámetro = 6" ó 10" Altura = Variable ó 7.1" x 12.6" x 1.6"	<ul style="list-style-type: none"> • Analiza el daño producido por la humedad, así como a adherencia asfalto –pétreo. • Se pueden ensayar 2 probetas al mismo tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo potencial de aceptación en los Estados Unidos de Norteamérica
Rueda Cargada Francesa	10.2" x 19.7" x .8" a 3.9"	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden ser ensayadas al mismo tiempo dos losas de mezcla asfáltica. 	<ul style="list-style-type: none"> • No es muy utilizado en los Estados Unidos de Norteamérica
Pista de Ensayo de Laboratorio	Diámetro = 4" Altura = 2" Y otros.	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede realizar el ensayo fácilmente y su duración es corta. 	<ul style="list-style-type: none"> • En México el equipo no está disponible en muchos laboratorios.

TABLA 3.4.4

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS ENSAYOS DE SIMULACIÓN PARA EVALUAR LA SUCEPTIBILIDAD DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES EN MEZCLAS SFÁLTICAS

FUENTE: < BROWN, KANDHALM JINGNA, (2001).>

Como nuestro objetivo general es la realización de un prototipo para poder evaluar las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas y éste será un equipo de ensayo de simulación, a continuación se describirán brevemente algunos de los equipos que se utilizan con la misma finalidad en distintos países.



RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

Esta máquina se desarrolló en la década de los 70's en la ciudad de Hamburgo, Alemania, por la compañía Esso A.G. Mediante éste ensayo se puede analizar el efecto combinado del ahuellamiento y los daños causados por el agua a una mezcla asfáltica, así como adherencia asfalto – pétreo, la probeta es sumergida en un baño de agua a una temperatura de 50° C.



FIGURA 3.4.3
RUEDA CARGADA DE HAMBURGO “HWTD”, DE LA EMPRESA SURFAX

Su método de ensayo está descrito en la Norma AASHTO TP 324 – 04. “Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted. Hot-Mix Asphalt (HMA)”. Se describirá detalladamente el método de ensayo en el Capítulo 4, “Ensayos de laboratorio” y podrá consultarse de manera completa en los anexos de éste documento.



RUEDA CARGADA FRANCESA

Este equipo se usa en Francia para evaluar mezclas sujetas a un tráfico pesado, mezclas que contienen materiales con tendencias a la formación de roderas, como las arenas naturales y mezclas que no tienen ninguna historia de comportamiento.

Los especímenes son sometidos a repetidas pasadas de una rueda neumática, la cual está montada en un carro que se mueve hacia delante y hacia atrás, induciendo una deformación permanente de la probeta.



FIGURA 3.4.4

RUEDA CARGADA FRANCESA "FWT"

FUENTE: <WWW.FHWA.GOV>

La losa tiene una longitud de 500 mm, 180 mm de ancho y 50 mm ó 100 mm de espesor, la cual es colocada en un molde de acero. La compactación de la probeta se da por un proceso de amasado, posteriormente de la compactación se deja la probeta en reposo a temperatura ambiente durante un periodo mínimo de 48 hrs y máximo de 7 días.

Se utiliza un neumático de caucho sobre losas de concreto asfáltico, las cuales pueden ser ensayadas a temperaturas que oscilan entre los 30° C y 70 °C.

Los neumáticos tienen un diámetro de 415 mm y una anchura de 110 mm. La presión de inflado es de 0.60 ± 0.03 MPa. Y la presión de la carga es de 5000 ± 50 N.



ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS (APA)

El equipo fue construido en 1996 por el Pavement Technology, Inc, en los Estados Unidos de Norteamérica, es una modificación de la máquina de Georgia, es utilizado ampliamente ya que se pueden analizar varias probetas al mismo tiempo; en este equipo lo que se desplaza son las ruedas, haciendo que su mecanismo se asemeje más a la realidad. Además de que tiene la ventaja de que se pueden ensayar probetas en seco y sumergidas en agua. Maneja un rango de temperatura de los 5° C a los 70° C.

Su método de ensayo está descrito en la Norma AASHTO TP 63 – 07. “Standard Method of Test for Determining Rutting Susceptibility of Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA)”, el cual podrá consultarse en los anexos de éste documento, posteriormente se describirá detalladamente el método de ensayo en el Capítulo 4, “Ensayos de laboratorio”.



FIGURA 3.4.5.

ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA”, DEL INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE



PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO ESPAÑOLA

Esta máquina se utiliza para evaluar la resistencia a la deformación de materiales asfálticos, bajo condiciones que simulan el efecto de tráfico. Una muestra se desplaza sobre una mesa oscilante bajo una rueda sometida a una carga con ciertas condiciones de velocidad y de temperatura, la penetración de la rueda produce una huella cuya profundidad es continuamente medida durante el ensayo. La resistencia a la deformación es normalmente cuantificada con el ratio de rodadura calculado en el último tercio del ensayo o la profundidad de la huella medida al final del ensayo. Las probetas del ensayo pueden ser preparadas en el laboratorio o ser testigos extraídos de la misma carretera, con un diámetro de 200 mm.





ENSAYOS A ESCALA REAL

A partir de la década de los 80's en varios países se han utilizado pistas de ensayo a escala real en las que se producen de manera acelerada y controlada los efectos del tráfico en la estructura del pavimento.

LCPC

El Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), "Laboratorio Central de Puentes y Carreteras" puso en marcha en 1984 un centro de pruebas, el cual permite reproducir en menos de una semana hasta un año completo del tráfico de camiones de carga, con velocidades de hasta 100 km/hr.

Las pruebas pueden centrarse tanto en nuevas estructuras de pavimento, como en su mantenimiento y refuerzo. Las observaciones y mediciones permiten evaluar el comportamiento de los materiales respecto a deformación por fatiga como por deformación plástica, así como la evolución de las características de la superficie del pavimento, el desgaste de los neumáticos, etc.

El carrusel está compuesto de una torre central y cuatro brazos, cuyos extremos pueden ser equipados con diversas configuraciones de carga (ruedas de camiones): individual o ruedas gemelas montado en un eje simple o eje tándem, y solo las ruedas sobre un eje triple. Gracias a la longitud del brazo (20 m), la velocidad de movimiento de cargas puede alcanzar los 100 km/hr.

La prueba de pista está compuesta por 3 anillos de 110 m de largo, con un radio de 17.50 m y un ancho de 6 m. Es posible colocar las cargas con diferentes radios de giro dependiendo de la longitud del brazo.

Es posible evaluar el comportamiento del pavimento y los modelos de diseño, estudiar la agresividad de las diversas configuraciones de carga de camiones, vehículos de transporte público, etc.



FIGURA 3.4.7

CARRUSEL DE FATIGA

FUENTE: <WWW.LCPC.FR)

CEDEX

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) cuenta con una Pista de Ensayo de Pavimentos a escala real, en la cual se hacen circular de forma continuada unos vehículos sobre secciones de pavimento de carretera, analizando tanto su respuesta ante las cargas, como la aparición y evolución de deterioros.

La instalación consta de 2 tramos rectos de 75 m cada uno, unidos por dos tramos circulares. Se pueden ensayar simultáneamente 6 secciones de pavimentos de 25 m cada una, en las zonas curvas se realizan ensayos sobre señalización horizontal y tratamientos superficiales. La sección de ensayo es de 8 m de ancho y 2.6 m de profundidad.



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

Los pavimentos se construyen con materiales y maquinaria usuales en carretera. La simulación del tráfico se efectúa mediante vehículos guiados por una viga de concreto, cuyas características corresponden a las de un camión con la máxima carga reglamentaria, cuenta con 2 vehículos que simula el tráfico pesado. Además, cuenta con un dispositivo controlado de simulación de lluvia.

El Centro de Control situado en el interior de la pista completa las instalaciones. En él se reciben y gestionan todos los datos y se controlan todos los componentes de la instalación. La capacidad de aplicación de cargas es de un millón al año por vehículo.

El comportamiento del pavimento ante el paso de las cargas y su evolución en el tiempo es medida mediante equipos de auscultación y 400 sensores de medida colocados en el pavimento.



FIGURA 3.4.8

PISTA DE ENSAYO DE PAVIMENTOS A ESCALA REAL DEL CEDEX

FUENTE: <WWW.CEDEX.ES>



3.5 TRAMOS CON DEFORMACIONES PERMANENTES EN EL ESTADO DE MICHOACÁN.

Los criterios de diseño con los que fueron construidas más del 60% de nuestras carreteras son diferentes a los que tenemos actualmente, si a esto le agregamos que las dimensiones y pesos de los vehículos se han incrementado y que el volumen de los mismos también lo ha hecho, es lógico pensar que puedan presentar problemas de fatiga y deformación permanente.

A continuación se darán como ejemplos algunos tramos carreteros a cargo de la Junta de Caminos y de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes que presentan deformaciones permanentes, los datos fueron obtenidos de los Inventarios Anuales que se realizan a partir de una Inspección Visual realizada por los Residentes de dichas Instituciones.

En estos tramos se han presentado frecuentemente problemas de deformación permanente, esto se debe a problemas en la mezcla asfáltica, otros casos son como consecuencia de que algunas de estas carreteras fueron construidas sobre suelos agrícolas de calidad pobre, donde se tomaban préstamos laterales para los terraplenes, contando estos con gran cantidad de materia orgánica, razón por la cual al incrementarse el número de cargas y la intensidad de la misma se han presentado asentamientos y deformaciones en la estructura del pavimento.

3.5.1 TRAMOS A CARGO SCT

CARRETERA	TRAMO	KM CON DEFORMACIONES
Ruta 15. Zamora – La Piedad	E.C. La Piedad – Rinconada Ecuandureo	18+900 al 46+400
Ruta 15. Morelia– Guadalajara	Libramiento de Jiquilpan	0+000 al 2+400
Ruta 110. La Piedad – Jiquilpan	Briseñas – Sahuayo	0+000 al 13+250

TABLA 3.5.1

TRAMOS CON DEFORMACIONES PERMANENTES EN EL ESTADO DE MICHOACÁN A CARGO DE LA SCT

FUENTE <SUB-DIRECCIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA SCT (JUNIO DE 2008).>



3.5.2 TRAMOS A CARGO DE LA JUNTA DE CAMINOS DEL ESTADO

Los datos resaltados, son los que presentan mayores problemas de deformación permanente.

TRAMO	LONGITUD DEL TRAMO	KM CON DEFORMACIONES
Cuitzeo – Puruándiro --Zináparo	123.7 km	2+000 al 9+000
Morelia – Jiquilpan, tramo Fco. J. Mújica	5 km	2+000 al 5+000
Zacapu – Villa Chuato	43.4 km	15+000 al 20+000
E.C. Jiquilpan – Gómez Farías – San Antonio Ocampo	6.7 km	4+000 al 6+700
E.C. Morelia – Salamanca – Copándaro	35.5 km	24+000 al 35+000
Acceso a Numarán	1.3 km	0+000 al 1+300
Churintzio – La Noria	5 km	0+000 al 3+000
Numarán – El Triunfo	5 km	2+000 al 4+000
Ramal a Tierras Blancas	4 km	0+000 al 3+000
E.C. Puruándiro – Zinaparo – Pascual Ortiz	62 km	10+000 al 62+000
Uruápan – Tarétan	29 km	0+000 al 29+000
Capacuaro – Peribán	50 km	30+000 al 50+000
Peribán – Buena Vista	50 km	0+000 al 10+000 35+000 al 45+000
E. C. Pátzcuaro – Uruápan, Subtramo Pichataro –Nahuatzen --Cherán	50 km	0+000 al 10+000 30+000 al 37+000
Taretán – Guadalupe	10 km	0+000 al 10+000
Corupo – San Felipe de los Herreros --Pomacuaran	27 km	0+000 al 27+000
Aranza – Cheranástico	5 km	0+000 al 5+000

TABLA 3.5.2
**TRAMOS CON DEFORMACIONES PERMANENTES EN EL ESTADO DE MICHOACÁN
A CARGO DE LA JUNTA DE CAMINOS DEL ESTADO**

FUENTE < SUB-DIRECCIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA JUNTA DE CAMINOS
DEL ESTADO DE MICHOACÁN (MAYO DE 2008).>



3.6 INVESTIGACIONES REALIZADAS EN DISTINTOS PAÍSES

Debido a la importancia que tienen las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas y a la influencia que estas tienen en el confort y seguridad del usuario, investigadores de varios países se han dado a la tarea de realizar diversos estudios evaluando distintos factores que afectan a la deformación permanente. Se obtuvo información relevante de publicaciones presentadas en distintos eventos como el CILA, AMIVTAC, así como en revistas de carácter internacional, entre otros.

Todos estos estudios, nos confirman la importancia de la caracterización tanto de los asfaltos como del material pétreo al momento de elaborar las mezclas asfálticas. Entre los resultados de las investigaciones recientes podemos mencionar:

3.6.1 CHILE

- Investigadores de el Centro de Ingeniería e Investigación Vial (Thenoux, Carrillo, 2002), han llegado a una serie de conclusiones y recomendaciones de diseño en base a los resultados obtenidos de estudios realizados en proyectos post – construcción de varios casos de ahuellamiento y exudación de mezclas asfálticas, en concesiones viales construidas de 1995 al 2002.

Ellos han utilizado la palabra *ahuellamiento* para referirse a la deformación plástica de la mezcla asfáltica, y la palabra *deformación* para referirse a las deformaciones por tensiones de las capas subyacentes. Sugieren el uso del sistema SUPERPAVE para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas respecto a los problemas de deformación permanente. Considerando que los factores más importantes que deben ser estudiados son la granulometría del material pétreo y el nivel de compactación.



- Debido al bajo rendimiento y al encarecimiento que tienen los métodos manuales o puntuales vs el alto rendimiento, la seguridad vial y los bajos costos de operación comparativamente de los métodos en campo para medir la deformación plástica, (Cabrera, Lucero, Molina, 2002), realizaron una comparación entre los resultados obtenidos con el Transverse Profile Logger (TPL) “Perfil Transversal” y con datos reales de mediciones manuales de manera puntual con la regla AASHTO de 1.2 metros. Estableciendo factores de correlación, determinaron correlaciones estadísticas aceptables.

Con el fin de tener una mayor representatividad posible, analizaron tramos de caminos, carreteras y autopistas con distintas características de estructura del pavimento, edad del pavimento, sollicitación y nivel de tránsito, así como una distinta ubicación geográfica y condición climática. Las mediciones fueron hechas sobre mezclas asfálticas densas, utilizando un modelo de predicción.

Concluyeron que a pesar de que difícilmente el vehículo que transporta el TPL circulará en dirección totalmente recta y los puntos de las mediciones manuales no coincidirán exactamente, dicho equipo entrega buenas estimaciones del nivel de ahuellamiento.

Debido a la velocidad con que pueden hacerse las mediciones, a la seguridad vial que ofrece, al no necesitarse señalamiento estático y al bajo costo de operación comparado con la medición manual con la regla de 1.2 m; consideran que el TPL es una herramienta útil para mejorar la gestión y calcular en menor tiempo el ahuellamiento producido en las carreteras.

3.6.2 COLOMBIA

- Reyes, Reyes y Troncoso (2006). Realizaron estudios para determinar el efecto de la presión de contacto y la temperatura en el ahuellamiento de una mezcla con granulometría cerrada, a partir del estudio de la presión y temperatura normalizada de 0.9 MPa y 60°C. Variaron la presión de contacto entre 0.18 y 0.90 MPa, con incrementos de 0.18 MPa y una temperatura entre 40°C a 70°C, con incrementos de 10 °C.



Demostraron que a mayor temperatura y presión de contacto, se incrementa la deformación permanente de las mezclas asfálticas. Observando que a una temperatura de 50 °C a la misma presión, el comportamiento de la deformación permanente es similar.

Además concluyeron que para las carreteras colombianas la temperatura de ensayo no debe ser de 60°C y que las presiones de contacto si deben ser mayores a las establecidas por su normativa.

3.6.3 ESPAÑA – MÉXICO

- Padilla Rodríguez (2004). Analizó el comportamiento de las mezclas densas mexicanas ante las deformaciones plásticas, con la normativa que establece la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Realizando ensayos Marshall y en la Pista de Ensayo de Laboratorio. Para el Ensayo Marshall utilizó 3 diferentes granulometrías y 2 tipos de asfalto, para el ensayo de Pista solo utilizó las curvas granulométricas superior e inferior.

Concluyó que el asfalto influye decisivamente en el comportamiento de las mezclas ante las deformaciones permanentes, debido a que aunque se tenga el mismo tipo de agregados, la misma granulometría con un mismo contenido de asfalto e igual contenido de vacíos, puede tenerse o no una resistencia a las deformaciones permanentes, ya que este factor está en función de las propiedades del ligante asfáltico que se le añade a la mezcla aunque sea de similar penetración.

Destaca que si se tiene un adecuado control del porcentaje de vacíos en el diseño Marshall, se puede asegurar la resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica.



3.6.4 FRANCIA

- Como se mencionó anteriormente el LCPC cuenta una pista de ensayo para deformaciones permanentes. En 1998 llevaron a cabo un estudio para comparar la agresividad de la deformación permanente utilizando 2 configuraciones de ejes: eje simple y eje triple con semirremolque, utilizando una mezcla asfáltica normal y tres con aglutinantes con baja susceptibilidad térmica.

Comprobaron que la pista de ensayo reproduce satisfactoriamente el comportamiento que tiene el pavimento en campo y que las carpetas con aglutinantes presentan poca susceptibilidad térmica a la deformación permanente.

3.6.5 MÉXICO

- Centeno y Cremades (2007). Evaluaron distintos tipos de asfalto, a la temperatura de ensayo que marca la Norma NLT – 173, a la temperatura máxima PG y a la temperatura de falla + 3° C a la temperatura del ensayo y a la temperatura de falla. Para estos ensayos utilizaron 5 distintos tipos de asfalto en la Pista de ensayo de Laboratorio, comprobaron que la adición de polímeros a las mezclas asfálticas favorece su resistencia a la deformación permanente, teniendo un mejor comportamiento ante estas el asfalto modificado con Elvaloy.

Además de que hicieron los ensayos reológicos al asfalto concluyendo que existe una correlación entre el comportamiento de las mezclas asfálticas evaluadas en la Pista de Ensayo de Laboratorio y el comportamiento que se predice mediante la caracterización reológica de los asfaltos en el método creep repetido.

- Garnica, Delgado y Sandoval, (2005), analizaron el efecto que tiene la variación de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfáltica, como: el nivel de compactación, contenido asfáltico, uso de asfaltos modificados, etc.



Capítulo 3. Deformaciones Permanentes en Mezclas Asfálticas

En sus estudios, la variación del contenido asfáltico tuvo poca influencia en cuanto a los valores de deformación permanente. Al utilizar el Compactador giratorio y utilizar 50 giros, encontraron que la mezcla presentaba una mayor deformación permanente después de ser ensayada en el APA.

- Garnica, Delgado y Gómez (2004), la influencia del método de compactación en el comportamiento de las mezclas asfálticas, utilizando en sus ensayos en compactador Giratorio Superpave y el Martillo Marshall. Sometieron las probetas varios ensayos mecánicos, entre ellos al ensayo en el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA).

Encontraron que las probetas fabricadas con el compactador giratorio tenían una mayor deformación permanente que las elaboradas con el Martillo Marshall; sin embargo, la diferencia entre estos valores era mínima, por lo que concluyeron que el método de compactación no parecía afectar el desempeño de la mezcla asfáltica ante las deformaciones permanentes.

- Con la creación del equipo de la UMSNH, ha sido posible la elaboración de pruebas para la realización de 4 Tesis de Licenciatura, así como la de Publicaciones y la presentación de ponencias en congresos a Nivel Nacional e Internacional.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”





CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"

4.1 INTRODUCCIÓN

Como ya se mencionó, durante su vida útil, las carreteras están sometidas a millones de repeticiones de carga. Si la mezcla asfáltica tiene una mala calidad, las cargas transmitidas por los vehículos pueden ocasionar que se presenten problemas de deformación permanente en la carpeta asfáltica, cuando un pavimento se deforma deja de cumplir las características para las que fue diseñado.

A pesar de que éste es un problema que se presenta con frecuencia, actualmente en México no existe un procedimiento definido para el control de deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas y por consiguiente tampoco los equipos suficientes para predecir este



comportamiento. Como se observó en el capítulo anterior, al no contar con un parámetro de control, se han presentado estos problemas en la Red Estatal de Michoacán y en otros lugares del país.

Debido a los altos costos de los equipos comerciales y a los factores mencionados anteriormente, en la UMSNH se tomó la decisión de desarrollar un equipo propio a mucho menor costo con el que se pudiera evaluar la resistencia a las deformaciones permanentes de probetas fabricadas en laboratorio y testigos extraídos de las carreteras, con ello se podrán seleccionar de una mejor manera los materiales utilizados en el diseño de las mezclas asfálticas.

Se realizó una investigación acerca de los equipos que se utilizan a nivel mundial para medir la deformación permanente de las mezclas asfálticas, analizando el sistema de aplicación de la carga, la simulación del neumático sobre la probeta, el costo que representaría fabricar el equipo, entre otros. Finalmente se decidió realizar un equipo basado en la Norma Española NLT – 173 / 00 "Resistencia a la Deformación Plástica de Mezclas Bituminosas Mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio"; sobre el cual se hicieron algunas adecuaciones, principalmente para poder realizar ensayos en probetas circulares de 4" y 6" fabricadas en laboratorio, así como testigos extraídos de campo.

Básicamente el equipo consiste en un carro de forma rectangular, el cual es movido de forma neumática por un actuador lineal, produciéndose un movimiento horizontal de vaivén. Encima del carro está colocada la rueda de acero con recubrimiento de goma, unida por un brazo de palanca a la estructura de la máquina, del otro lado se encuentra un recipiente dentro del cual se colocaron balines de acero, con los cuales se logró transmitir una carga equivalente de 81 kg-f a las probetas.

Dentro de la cámara termostática debe existir una temperatura constante y homogénea, para lograrlo se colocaron unas resistencias en la parte superior de la cámara y un ventilador por medio del cual se hace circular el aire caliente en toda la cámara.



4.2 DISEÑO DEL PROTOTIPO

Inicialmente, el desarrollo del prototipo se basó en la Normativa Española, sin embargo con el transcurso del tiempo se decidió que pudieran cambiarse los parámetros para efectos de investigación, así como aquellos que pueden afectar en México, los cuales como son:

- **La temperatura del ensayo.** Se deben considerar las temperaturas de servicio a las cuales están expuestas la superficie del pavimento en las distintas zonas del país.
- **La presión del neumático.** Se puede adecuar a la carga por Eje Equivalente para cualquier tipo de carga que se quiera, ya sea de 8.2 ton, o las que son ejercidas por los ejes sobrecargados que circulan por la red carretera mexicana.
- **La velocidad del desplazamiento.** Se deben considerar las velocidades a las cuales están sometidos nuestros pavimentos, sobre todos en tramos con pendientes pronunciadas.
- **La amplitud del desplazamiento.** Esto se hará en función del tipo de probeta que se ensaye, ya sea de 4" ó 6". Si posteriormente se realiza otro molde para la extracción de corazones de 10", también podría ajustarse la amplitud del desplazamiento.

A continuación se especifican las principales características que están establecidas en la Norma Española NLT – 173 / 00 "Resistencia a la Deformación Plástica de Mezclas asfálticas Mediante la Pista de Ensayo de Laboratorio", sobre las cuales se hicieron algunas adecuaciones para la fabricación del prototipo.

4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO

La máquina consiste en un carretón móvil de forma rectangular, soportado en cuatro puntos por un sistema horizontal – vertical de ruedas metálicas provistas de cojinetes de bolas, las cuales se deslizan sobre unos perfiles metálicos de apoyo en forma de L.

El carretón está unido a un actuador lineal alimentado por aire comprimido, el cual al estar en funcionamiento produce un movimiento alternativo horizontal de vaivén. Encima de éste



Capítulo 4. Descripción del Prototipo "Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH"

carretón va colocada la rueda de ensayo, montada en un brazo sustentador formado por una pareja de perfiles en L, brazo que, en uno de sus extremos, va unido mediante una chumacera horizontal a un soporte rígido de la máquina y el otro extremo libre y provisto de un recipiente de acero el cual será llenado con balines de acero, con los cuales se pueden producir las diferentes cargas sobre la rueda. El carretón móvil dispone de los elementos necesarios para la sujeción al mismo del molde de acero que contiene las probetas de ensayo (Figura 4.2.1).

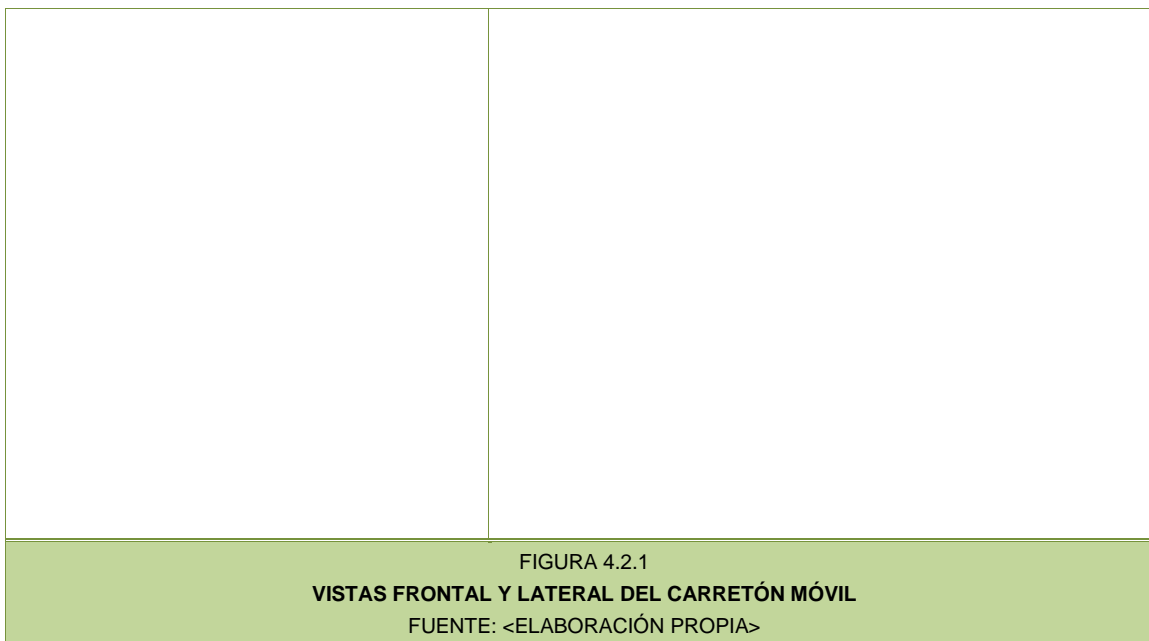


FIGURA 4.2.1
VISTAS FRONTAL Y LATERAL DEL CARRETÓN MÓVIL
FUENTE: <ELABORACIÓN PROPIA>

Sobre el brazo que sujeta la rueda de ensayo, está unido un perfil en L en el cual va sujeto un indicador de carátula, al cual se le adaptó un dispositivo de frenado del desplazamiento máximo del vástago. Éste indicador permite tomar la lectura de las deformaciones verticales que se produzcan en la probeta durante el ensayo, posteriormente será posible colocar algún transductor de desplazamiento.

La rueda de ensayo es metálica y está cubierta de una banda de rodadura de caucho de 5 cm de ancho y 1 cm de espesor.

La presión de contacto normalizada ejercida por la rueda cargada sobre la superficie de la probeta durante todo el ensayo, es de $900 \pm 25 \text{ kN/m}^2$, ($9 \pm 0.25 \text{ kg}\cdot\text{f/cm}^2$), para todo tipo de



mezclas y zonas climáticas. Sin embargo, en casos especiales o cuando así se requiera, pueden utilizarse otras presiones de contacto. Debido a que el prototipo está basado en una Normativa española, ésta carga corresponde a un Eje Equivalente de 13 ton, posteriormente puede ser adecuada a la presión ejercida por Eje Equivalente de 8.2 ton que es el usado en México para el diseño de pavimentos o a la presión que se quiera estudiar.

El mecanismo de arrastre del carretón móvil está diseñado para permitir una frecuencia del movimiento de vaivén de 42 ± 1 pasadas por minuto y un recorrido en cada sentido de 23 ± 0.5 cm. La longitud del recorrido puede ser ajustada mediante unos detectores de posición y la velocidad del desplazamiento es ajustada por medio de unas válvulas de estrangulación, las cuales regulan el aire comprimido que hace posible el desplazamiento del carretón móvil.

Para lograr que la temperatura sea constante durante el ensayo, se dispone de una cámara termostática que permite alojar la máquina y mantener la temperatura durante todo el ensayo con una variación máxima de ± 1 °C, la cámara está construida con perfiles metálicos y paneles aislantes. En uno de sus frentes lleva una ventana abatible con acrílico transparente para permitir la lectura durante el ensayo de las deformaciones máximas producidas, así como de la temperatura. En uno de sus lados va situada la puerta de acceso de la máquina, para la colocación y retiro de la probeta (Figura 4.2.3).

En la parte superior de la cámara van colocadas unas resistencias eléctricas, con termostato regulable desde el exterior, y un ventilador para homogeneizar la temperatura en el interior de la cámara.

Para la realización de los ensayos se cuenta con 2 moldes rectangulares de acero de 300 x 300 mm. Además se pueden realizar ensayos con probetas de 4" y 6", para lo cual se cuenta con 2 moldes de Nylamid, los cuales se colocan dentro del molde de acero. Con esta adaptación es posible ensayar testigos tanto extraídos de campo, como hechos en laboratorio, compactados mediante el martillo Marshall o utilizando el Compactador Giratorio SUPERPAVE.

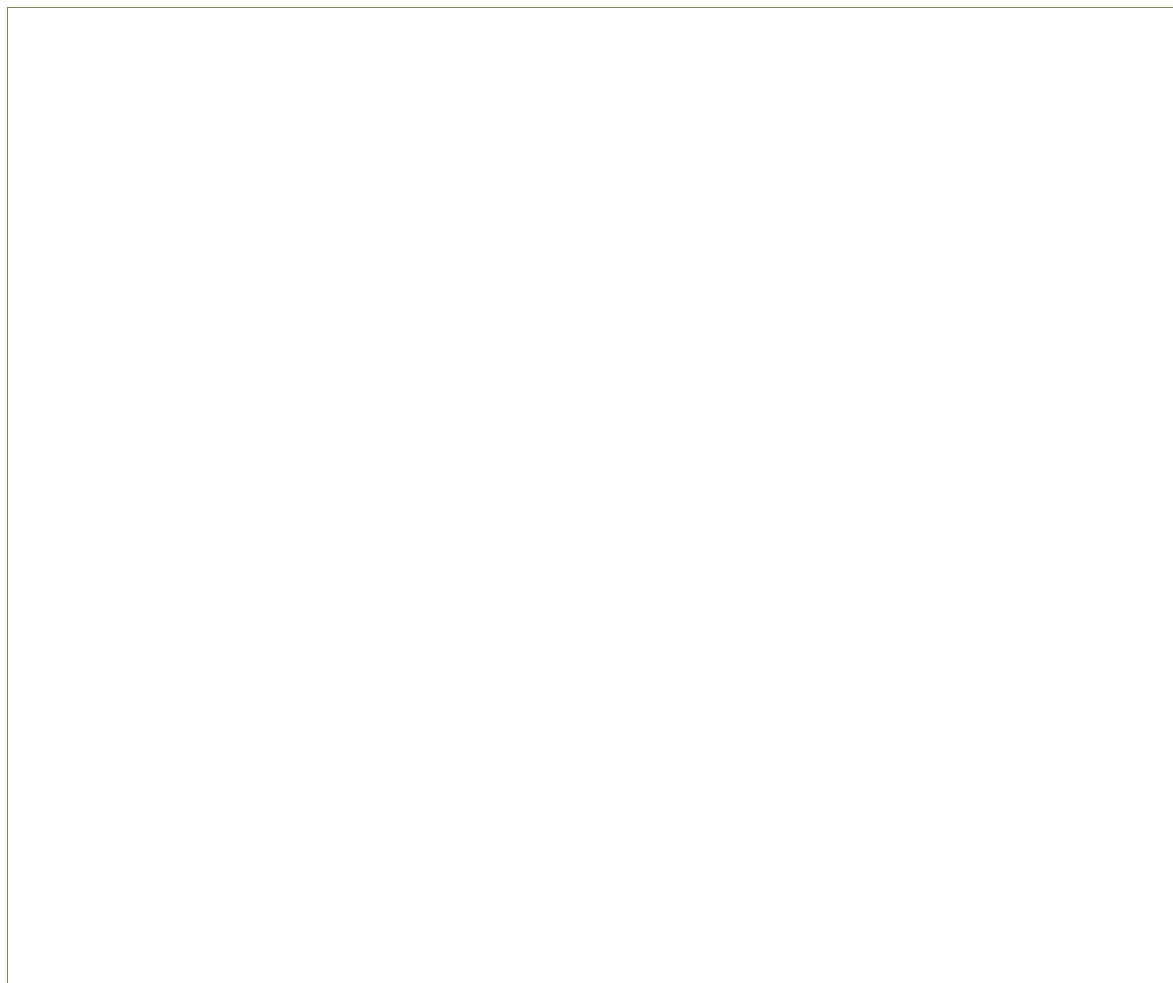


FIGURA 4.2.2
CÁMARA TERMOSTÁTICA
FUENTE: <ELABORACIÓN PROPIA >

Las dimensiones de la máquina para el ensayo de pista podrán observarse en los Anexos de este documento.



4.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

El ensayo consiste en someter una probeta de mezcla asfáltica, al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida.

El procedimiento es aplicable principalmente a las mezclas asfálticas fabricadas en caliente y destinadas a trabajar en condiciones severas de tráfico y clima, aunque variando las condiciones del ensayo puede también ser de utilidad en otros tipos de mezclas.

Para cada ensayo se fabricarán un mínimo de 6 probetas de 4" y 4 probetas de 6", por cada variable de ensayo que se desee evaluar (contenido y tipo de asfalto, temperatura, presión de contacto, etc.).

La cantidad de mezcla necesaria para cada probeta se calculará a partir de los valores correspondientes al diámetro o volumen de la probeta y a la densidad relativa de la mezcla, para cuya aplicación se seguirán los siguientes criterios:

- En mezclas densas y semidensas (tráficos pesado y medio), se tomará para la densidad de la probeta el 97 % como mínimo.
- En las restantes mezclas, el cálculo se basará en el 95 % de la densidad relativa.

Para la fabricación de las pastillas es posible realizar el proceso de compactación mediante el martillo Marshall o por medio del Compactador giratorio, si en un futuro se cuenta con un sistema de compactación para las probetas cuadradas de 300 x 300 mm, estas también podrán ensayarse en el equipo. Una vez finalizada la compactación de las probetas, se dejarán enfriar a temperatura ambiente durante un periodo entre 12 y 24 horas, antes de ser ensayadas, una vez frías se determinan sus características volumétricas (alturas, densidades y porcentaje de vacíos).

Antes de realizar el ensayo, las probetas deben ser cortadas cuidadosamente a una altura de 50 mm, ya sea que se hayan fabricado en laboratorio o que sean testigos extraídos de un pavimento construido.



Después del periodo de enfriamiento y del corte de las probetas a la altura necesaria para el ensayo, se introducirán en un horno a una temperatura de 60 ± 2 °C durante un periodo mínimo de 2 hrs antes de la ejecución del ensayo, con el fin de contar con una temperatura homogénea en las probetas al momento de realizar el ensayo. La temperatura normalizada para el ensayo será de 60 ± 1 °C para todo tipo de mezclas y zonas climáticas. No obstante, pueden utilizarse otras temperaturas en estudios o ensayos especiales que así lo requieran.

Dos horas antes del comienzo del ensayo se conecta el sistema de calefacción de la cámara termostática, regulándolo a la temperatura especificada. Transcurrido este tiempo, se sacan las primeras probetas de la estufa, se levanta la rueda y se fija el molde con las probetas en los anclajes que para este fin lleva el carretón móvil, sin que la rueda toque en ningún momento la superficie de las probetas. En éstas condiciones se carga el brazo soporte con las pesas necesarias para conseguir la presión especificada, se cierra la cámara y se espera unos 30 minutos con objeto de homogeneizar la temperatura del ensayo.

Posteriormente se apoya la rueda cargada sobre la superficie de las probetas y se pone en marcha el carretón durante tres pasadas completas, para conseguir un asentamiento de la rueda sobre las probetas.

A continuación se para el carretón y, situándolo en el punto de medida del indicador de carátula, se pone éste a cero. Se cierra entonces la ventana lateral y transcurridos unos 5 minutos se comienza el ensayo, poniendo en movimiento el carretón durante un periodo de tiempo de 120 minutos sin interrupciones, o hasta que la deformación total alcance 15 mm, si ocurre antes. Se deben hacer periódicamente las correspondientes lecturas de la deformación.

Una vez finalizado el ensayo, se detiene la máquina, se levanta la rueda y se extraen las probetas ensayadas, colocando seguidamente las siguientes y repitiendo el mismo procedimiento de ensayo tal como se ha descrito.



CÁLCULOS Y RESULTADOS

Se determinan y anotan las deformaciones totales leídas en el indicador de carátula en los minutos 1, 3 y 5 contados a partir del comienzo del ensayo; a continuación cada 5 minutos hasta completar los 45 minutos y, a partir de aquí, cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración del ensayo.

Ensayadas todas las probetas, se calculan los valores medios de todas las deformaciones registradas correspondientes, los cuales se pasan a un gráfico deformación – tiempo y se dibuja la curva de deformación de la mezcla.

A partir de las deformaciones determinadas en el gráfico, correspondientes a los tiempos del ensayo, se calculan las velocidades medias de deformación mediante la siguiente expresión:

$$V_{t_2/t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{(t_2 - t_1)}$$

Donde:

V_{t_2/t_1} = Velocidad media en el intervalo de tiempo

d_{t_2} = Deformación medida en el tiempo 2

d_{t_1} = Deformación medida en el tiempo 1

t_2 = Tiempo de la deformación 2

t_1 = Tiempo de la deformación 1

La velocidad, V , de deformación media correspondiente al intervalo de tiempos t_2/t_1 , se expresará en 10^{-3} mm/min.

Los resultados del ensayo deben incluir la siguiente información:

- Tipo y características de la mezcla.
- Origen de la mezcla (laboratorio, obra, testigo, etcétera).
- Temperatura del ensayo.
- Presión de contacto.
- Deformación total al final del ensayo, en mm.
- Representación gráfica de la curva deformación – tiempo.
- Velocidades de deformación en aquellos intervalos de tiempo en los que se manifieste claramente el comportamiento de la mezcla en el ensayo.



Capítulo 4. Descripción del Prototipo "Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH"

En la Tabla 4.2.1 se muestran los valores de precisión de la prueba, los cuales se determinaron experimentalmente en el Reino Unido, siguiendo la norma ISO 5725. Las muestras procedentes del pavimento (testigos) se estudiaron en 1992 en 11 laboratorios de los que se excluyeron los datos procedentes de 1 por erráticos. Las muestras fabricadas en laboratorio se estudiaron en 1994 en 7 laboratorios. Para ambos experimentos (años 1992 y 1994) la temperatura de ensayo fue de 45° C, la carga de 700 N y los resultados son la media de la velocidad de deformación de 6 porciones de la muestra de ensayo.

MUESTRAS	NIVEL DEL RESULTADO DE ENSAYO (mm/hr)	REPETIBILIDAD r (mm/hr)	REPRODUCIBILIDAD R (mm/hr)
LABORATORIO	2.6	0.5	1.3
PAVIMENTO	2.2	0.8	1.4
	8.1	3.1	5.9
	13.5	4.0	5.7

TABLA 4.2.1
**PRECISIÓN PARA LAS VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN (mm/hr)
EN MEZCAS DE LABORATORIO Y PAVIMENTO**
FUENTE <NORMA ESPAÑOLA NLT – 173 / 00>



4.3 COMPONENTES DEL PROTOTIPO

Prácticamente el equipo está integrado por los siguientes componentes:

1. Dispositivo de alimentación de aire

Es el encargado de proporcionar la presión necesaria para el desplazamiento constante del carro en el transcurso de toda la prueba.

2. Unidad de control

Los controles de encendido/apagado, presión de aire y temperatura se encuentran ubicados en un gabinete metálico, en la parte superior de la cámara termostática. Posteriormente se describirá cada una de estas partes. Además las unidades de mantenimiento modulares de moderno diseño industrial incluyen todas las funciones necesarias para la preparación del aire comprimido.

3. Máquina de Ensayo

La normativa española utiliza para el movimiento del carro de desplazamiento un motor eléctrico, sin embargo, el prototipo que se fabricó en la UMSNH es alimentado por aire comprimido, el cual logra un movimiento constante en todo el ensayo.

4. Cámara Termostática

Debido a que el comportamiento del asfalto depende de la temperatura, el gradiente de ésta y del tiempo de aplicación de la carga, es necesario contar con una temperatura constante y homogénea durante todo el ensayo, para esto se creó una cámara termostática con paredes aislantes.



A continuación se muestran los componentes del prototipo

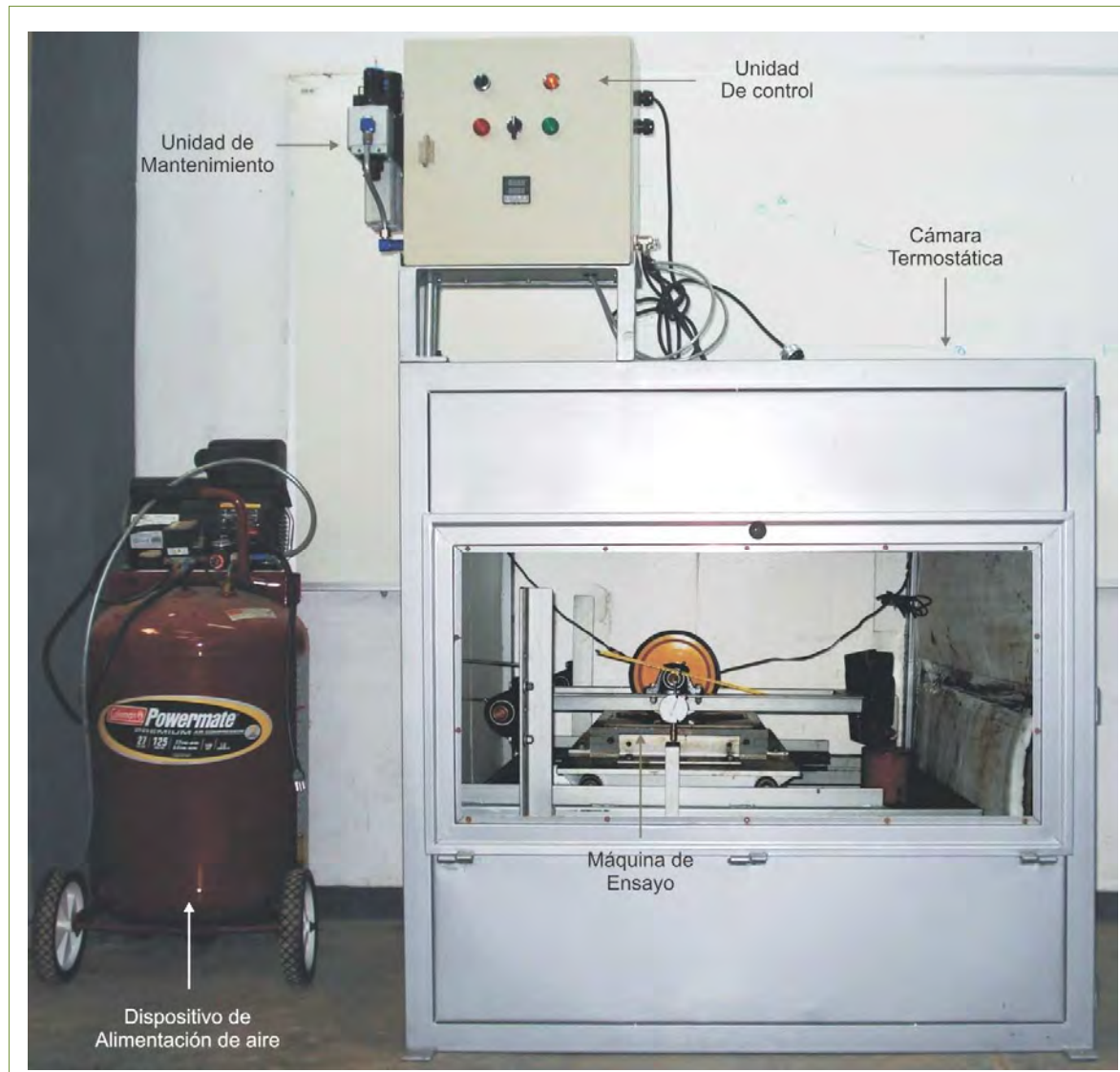


FIGURA 4.3.1

PRINCIPALES COMPONENTES DEL PROTOTIPO

En los anexos se podrán consultar los planos del equipo con cada uno de sus componentes.

A continuación se describirán cada uno de los componentes del equipo creado en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



4.3.1 DISPOSITIVO DE ALIMENTACIÓN DE AIRE

COMPRESOR DE AIRE

Es el encargado de suministrar el aire necesario para el funcionamiento adecuado del Equipo. Trabaja con una Presión de 95 A 125 PSI.



FIGURA 4.3.2
COMPRESOR DE AIRE

FUENTE: <WWW. COLEMANCOMERCI.COM.MX >

El compresor aumenta la presión y desplaza cierto tipo de fluidos llamados compresibles (gases y vapores), los cuales sufren un cambio apreciable de densidad y, generalmente, también de temperatura, esto lo realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la substancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

Por medio de un tubo flexible se conduce el aire comprimido hacia la unidad de mantenimiento, además cuenta con una válvula que permite cerrar o abrir el paso por completo del aire en ambos sentidos.



4.3.2 UNIDAD DE CONTROL

Esta unidad está alojada en un gabinete metálico de 400 X 400 X 200 mm. En ella se encuentran los controles de encendido y apagado, presión de aire y temperatura.

GABINETE METÁLICO



Los dispositivos en el gabinete se encuentran divididos en las siguientes partes:

- En la parte lateral izquierda se encuentra la unidad de mantenimiento.
- En la parte frontal se encuentran los controles de encendido / apagado, y el control de temperatura.
- En la parte interior se ubican las electroválvulas y la instalación eléctrica.
- En la parte lateral derecha. El control de velocidad del carro de desplazamiento.



4.3.3 UNIDAD DE MANTENIMIENTO

Es una unidad compuesta por un filtro, una válvula reguladora de presión, un lubricador y una válvula de cierre, las cuales se detallarán posteriormente. La presión inicial máxima es de 12 bar, filtro de 40 μm , con manómetro, botón regulador con llave, depósito y funda de material plástico, evacuación automática del condensado, sentido del flujo de izquierda a derecha, para el máximo aprovechamiento del aire comprimido. Gracias a los elementos de seguridad incluidos, existe poco riesgo de accidente.



FIGURA 4.3.4
UNIDAD DE MANTENIMIENTO

VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN CON MANÓMETRO Y FILTRO

La presión puede ser regulada aumentándola progresivamente de 0.5 a 12 bars, para evitar movimientos repentinos e imprevistos. Además la válvula mantiene el aire de control casi a niveles constantes. El filtro sintetizado con separador de agua por centrifugación, retiene las partículas de suciedad, los depósitos minerales de los tubos, el óxido y condensados; además, cuenta con una purga automática y al ser desconectado la presión puede disminuir rápidamente. (Figura. 4.3.5)



LUBRICADOR

Dosifica la cantidad de aceite necesario para enriquecer el flujo de aire comprimido. El aire fluye a través de una abertura en el sentido de la circulación. (Figura. 4.3.6)

VÁLVULA DE CIERRE DE ACCIONAMIENTO MANUAL

Cuenta con un botón giratorio con llave de cerrado de emergencia, puede añadirse un silenciador para disminuir los niveles de ruido, también puede ser bloqueada mediante un candado. (Fig. 4.3.7)



PIEZAS ESPECIALES UTILIZADAS EN LA UNIDAD DE MANTENIMIENTO

- **Acoplamiento hembra.** Está elaborado con latón niquelado, gracias a lo cual se encuentra protegido contra la corrosión, gracias a la variante con retención en ambos extremos puede utilizarse para aire comprimido, vacío y agua. Para Desconectarse solo se debe girar y tirar, lo cual reduce el riesgo de accidentes.



Capítulo 4. Descripción del Prototipo "Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH"

- **Cople.** Elaborado con una aleación forjable de aluminio anodizado azul.
- **Boquilla doble.** Tiene 2 juntas, Anillos de junta O en polímero, es de una aleación forjable de aluminio anodizado azul.
- **Codo.** Es una pieza angular con rosca interior y exterior, elaborado con una aleación forjable de aluminio anodizado azul.
- **Tapón ciego.** Hacen posible el funcionamiento correcto de aberturas no utilizadas, está hecho con aleación de aluminio.
- **Racor rápido roscado.** Para diámetro exterior del tubo flexible de 6 m, con rosca exterior con hexágono exterior. El tubo flexible se conecta y desconecta sin necesidad de hacer mucha fuerza, está elaborado con latón niquelado.
- **Escuadras de Fijación.** Con ellas fue posible el montaje de la unidad de mantenimiento en el gabinete, están diseñadas específicamente para soportar el peso de cada unidad, elaboradas con una fundición inyectada de Aluminio.
- **Tubo flexible.** Elaborado de TPE-U (PU). Resistente a la presión hasta 14 bar. A través del él, pasa el aire comprimido del compresor a la unidad de mantenimiento, para posteriormente ser conducido a las electroválvulas, las cuales se describirán posteriormente.





4.3.4 CONTROL DE ENCENDIDO/APAGADO DE LA MÁQUINA Y CONTROL DE TEMPERATURA

Como el control de temperatura está conectado independiente al control de inicio de la máquina, es posible iniciar la elevación de la temperatura sin necesidad de que la máquina esté funcionando.



CONTROL DE TEMPERATURA

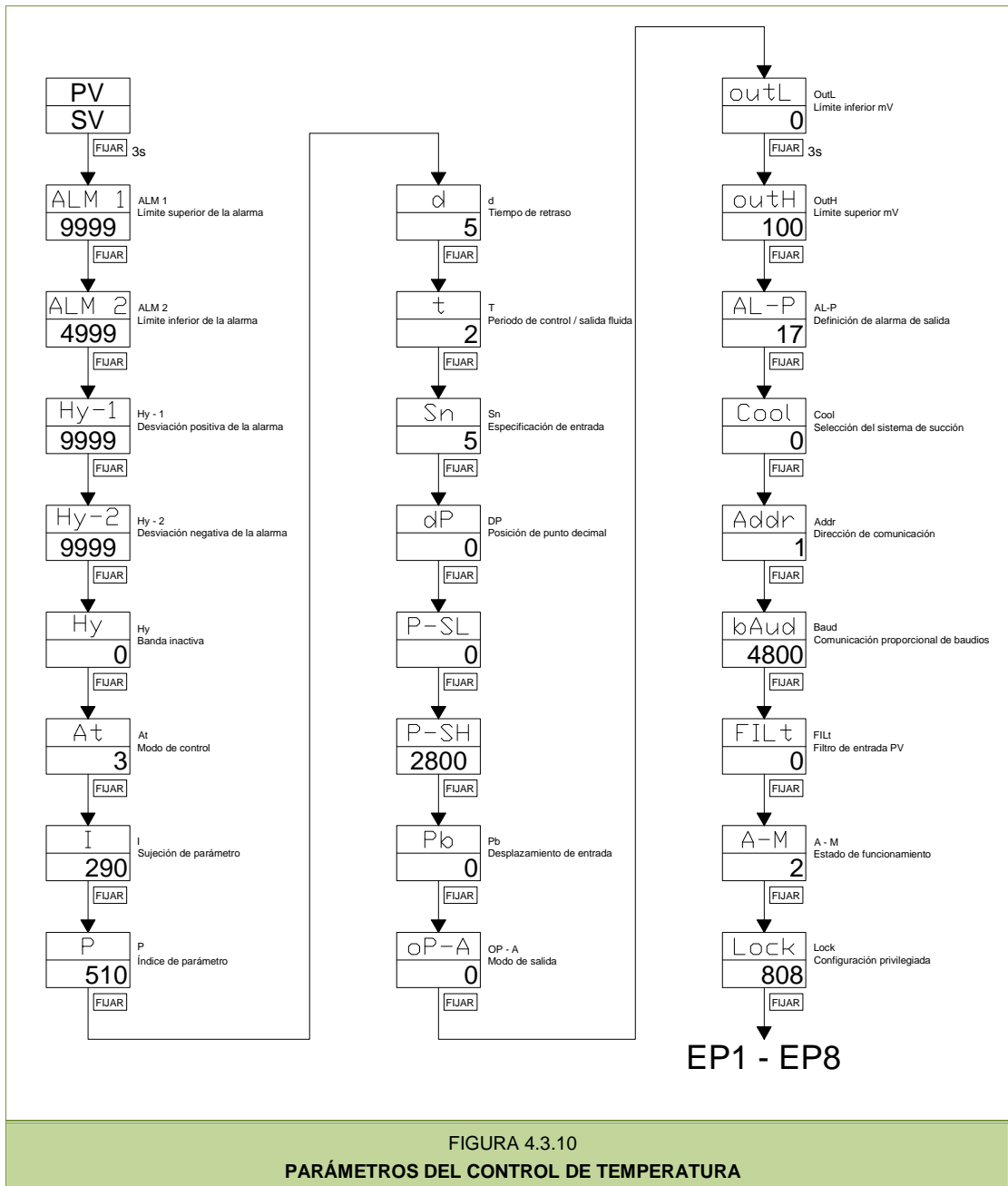
El funcionamiento de las resistencias eléctricas está controlado por medio de un termopar, el cual es un sensor eléctrico de temperatura que convierte la cantidad física "temperatura" en una señal eléctrica, enviando la señal a la pantalla del control de temperatura que se encuentra en la parte frontal del panel.

Para el ajuste de la temperatura se deben presionar la tecla ▲ o ▼ para definir un valor fijo, posteriormente se presionará ► o ◀ para modificar los datos de ajuste. Se debe pulsar la tecla SET para guarda y salir. Si no existe ninguna operación, en 10 segundos, automáticamente se saldrá de la función.



Capítulo 4. Descripción del Prototipo "Pista de Ensayo de Laboratorio UMICF"

En la Figura 4.3.10 se pueden observar códigos de ajuste de los parámetros para el control adecuado de la temperatura dentro de la cámara termostática.



La calibración de la temperatura en el interior de la cámara se logró colocando un termómetro de Mercurio dentro del equipo, y se fue modificando el parámetro PB para ajustarla.



Capítulo 4. Descripción del Prototipo "Pista de Ensayo de Laboratorio UMICF"

El control de temperatura cuenta con varios parámetros que es importante considerar para su uso correcto, los cuales se describirán posteriormente y se muestran en la Tabla 4.3.1.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	RANGO DE AJUSTE	UNIDAD	OBSERVACIONES
ALM1	Límite superior de la alarma	-1999~+9999	°C o una unidad definida	Unidad lineal para P-SL y P-SH cuando el voltaje/resistencia lineal son seleccionados
ALM2	Límite inferior de la alarma	-1999~+9999	°C o una unidad definida	
Hy-1	Desviación positiva de la alarma	0~+9999	0.1°C o una unidad definida	
Hy-2	Desviación negativa de la alarma	0~+9999	0.1°C o una unidad definida	
Hy	Banda inactiva	0~20°C ó 0~2000		Control de alarma de ENCENDIDO/APAGADO
At	Modo de control	0~3		
I	Sujeción de parámetro	0~9999	0.1°C o una unidad definida	0 desactivar la función integral
P	Índice de parámetro	1~9999		
d	Tiempo de retraso	0~2000		
t	Periodo de control/salida fluida	0~125		
Sn	Especificación de entrada	0, 1, 4, 5, 20, 21		Configuración de resolución variada
dIP	Posición de punto decimal	0~1		
P-SL	Espera			
P-SH				
Pb	Desplazamiento de entrada	-1999~+4000	0.1°C o una unidad definida	
OP-A	Modo de salida	0~2		
OUTL	Límite inferior	0~110	1%	
OUTH	Límite superior	0~110	1%	
AL-P	Definición de alarma de salida	17		
COOL	Selección del sistema de succión	0~1		
Addr	Dirección de comunicación	0~100		Límite de retransmisión de baja intensidad
bAud	Comunicación proporción de baudios	0~19200		Límite de retransmisión de alta intensidad
FILT	Filtro de entrada PV	0~20		Definición de la intensidad del filtro digital
A-M	Posición A-M	0. Manual 1. Automático 2. Manual de supresión		
Lock	Privilegio de la configuración	0~9999		
EP1-EP8	Definición de campos de parámetros	Ninguna A-M		

TABLA 4.3.1
RANGOS DE AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DEL CONTROL DE TEMPERATURA



Parámetros de Alarma "ALM1", "ALM2", "Hy-1", "Hy-2"

La alarma se activa para avisar del cierre (el contacto NC abierto), si la condición de la alarma se satisface. Los mensajes de alarma a su vez se muestran en la ventana SV. Cuando la causa de la alarma se elimina, entonces la alarma se borra automáticamente.

Condiciones de alarma:

- ALM1.** Límite superior absoluto de alarma. Si el valor es mayor que el valor especificado como "ALM1+Hy ", entonces la alarma está establecida y la alarma se cancelará si el valor es menor que el valor de " ALM1-Hy".
- ALM2.** Límite inferior absoluto de alarma. Si el valor es mayor que el valor especificado como "ALM2+Hy", entonces la alarma está establecida y la alarma se cancelará si el valor es menor que el valor de " ALM2-Hy".
- Hy-1.** Alarma Positiva. Si PV menos SV es mayor que el valor especificado como "Hy-1 + Hy", la alarma es establecida, la alarma se cancelará si el valor es menor que el valor de "Hy-1 – Hy". También se utiliza como el segundo límite superior de alarma en caso de encendido – apagado del control.
- Hy-2.** Desviación negativa de la alarma. Si PV menos SV es mayor que el valor especificado como "Hy-2 + Hy", la alarma es establecida, la alarma se cancelará si el valor es menor que el valor de "Hy-2 – Hy". También se utiliza como el segundo límite superior de alarma en caso de encendido – apagado del control.

La variable sobrepasa el rango configurado (de alto o de bajo límite), causadas por errores de configuración de tipo de sensor, desconexión de los sensores o de corto-circuito. En caso de sobrepasar el rango de entrada, los instrumentos de control se detendrán automáticamente y el valor especificado anteriormente en el parámetro "outL" será como la salida de valor manipulado.

El parámetro "orAL" no necesita ser configurado. Generalmente no es necesario activar las cuatro alarmas. Los valores límite ajustados para estos parámetros no pueden ser usados para evitar las funciones de la alarma. Por ejemplo, la siguiente configuración: ALM1= 9999, ALM2= -1999. Cuando la configuración de Hy-1 +9999 (para la temperatura de 999.9 °C) o



Hy-2 = 9999 (para la temperatura 999.9 °C) se fija, incluso si la diferencia de valor es mayor que 9999, Hy-1 o Hy-2, la alarma no se activará.

Parámetro "Hy" de banda inactiva

El parámetro "Hy" se establece para permitir la protección o posición del control de salida de altas oscilaciones de frecuencia causadas por procesos de fluctuación de salida. El parámetro "Hy" es utilizado para el control de posición, del control de las cuatro alarmas, así como el controlador de posición con sintonización automática.

Por ejemplo: El parámetro "Hy" puede afectar la alarma, siempre y cuando la alarma superior, el parámetro "ALM1" se ajuste a 800 °C, y el parámetro "Hy" se establezca a 2.0 °C.

- El instrumento se encontrará en estado normal al principio, cuando los valores superen los 802 °C (ALM1 + Hy), la alarma absoluta superior se activará.
- Cuando al principio el instrumento está en estado de alarma superior, los valores del proceso se vuelven menores a 798° C (ALM1 - Hy), la alarma se restablecerá.

Modo de control del parámetro "A"

At = 0 El control "ON OFF" es adecuado para las aplicaciones que no necesitan una alta precisión.

At = 1 Se trata de la mejora sobre la base de un control difuso PID, que tengan una mayor capacidad de adaptación al proceso, para obtener un buen control de éste. Es posible iniciarlo desde el panel frontal de ajuste.

At= 2 La función es la misma que a partir de la sintonización automática del panel frontal. Después que la sintonización automática esté hecha, se pueden iniciar más parámetros para At 2 en autosintonización.

At = 3 Esta configuración se establece automáticamente después de la autosintonización que se hace. Este ajuste, a partir de la sintonización automática del panel frontal, ha sido deshabilitado para evitar el error de comenzar la operación de ajuste automático en repetidas ocasiones.



Instrucciones del control de acciones PID

Banda proporcional "P"

La acción proporcional es la acción de control de salida que varía en proporción a la derivación entre el valor del parámetro de la transformación y la temperatura.

Si la banda proporcional es reducida, incluso si las salidas cambian por una ligera variación de la temperatura de procesamiento, se puede obtener un mejor resultado cuando el offset disminuye.

Sin embargo, si la banda proporcional es demasiado reducida, incluso con leves variaciones puede causar perturbaciones en el procesamiento de la temperatura, medidas de control de las modificaciones de ON / OFF de acción.

Por lo tanto, cuando el proceso de temperatura llega a la posición de equilibrio cerca de la fijación de un valor y la temperatura se mantiene constante, el valor más adecuado es seleccionado por reducir gradualmente la banda proporcional respetando los resultados del control.

Tiempo integral "I"

La acción integral se utiliza para eliminar el offset. Cuando el tiempo integral se acorta, la velocidad de retorno al punto de características por defecto se acelera. Sin embargo, la oscilación o ciclo también es acelerado y el control se vuelve inestable.

Tiempo Derivado "D"

El tiempo derivado se utiliza para restaurar el cambio en el proceso de temperatura de acuerdo a la tasa de cambio. Esto reduce la amplitud de sobrecalentamiento o baja temperatura.

Si el tiempo derivado se acorta, los valores de restauración se reducen y si el tiempo derivado se hace muy largo, un fenómeno de restauración excesiva puede ocurrir en el sistema de control que puede comenzar a oscilar.



Autoajuste del controlador PID

Con el fin de decidir cada uno de los valores de P, I, D y ARW automáticamente, este sistema varía la fuerza del objeto controlado.

- 1. Cuando la diferencia entre el valor de ajuste y el de transformación de temperatura es mayor que la temperatura, esta se eleva. La fluctuación se aplica a la temperatura de 20 °C más baja que el valor del parámetro.*
- 2. Cuando el control es estable, o cuando el control de temperatura se encuentra dentro de ± 20 °C de valor de ajuste. La fluctuación se aplica en el valor del parámetro.*
- 3. Cuando el control de la temperatura es de 20 °C o más alta que el valor del parámetro. La fluctuación se aplica a la temperatura de 20 °C más alta que el valor del parámetro.*

Restablecimiento automático (corrección Offset)

El restablecimiento automático se realiza para corregir el desplazamiento en el punto en donde el indicador PV es estabilizado con la proporcionalidad de la banda durante la acción PD.

Dado que el valor corregido es internamente memorizado, no es necesario para llevar a cabo el restablecimiento de nuevo, siempre y cuando el proceso sea el mismo.

Sin embargo, cuando la banda proporcional se establece en 0, el valor corregido se borra.

Período de salida "T"

El parámetro "T" se puede ajustar entre 0.5 y 125 segundos. Representa el cálculo de la velocidad del instrumento. Cuando T aumenta, la proporción se incrementa y la función derivada disminuye. Si la función $T \geq 5$ segundos, la derivada es totalmente eliminada, entonces se convierte en un sistema proporcional integral. El cambio de este parámetro casi no tiene influencia en el sistema si T es inferior a $\frac{1}{5}$ de su valor original.



El principio para ajustar el parámetro "T" es:

- En caso de que el modo de salida de tiempo sea proporcional, si SSR (relay de estado sólido), o PBR es usado como mando principal, el periodo de control podría reducirse (generalmente 0.5 a 2 segundos) para mejorar el control de precisión. En caso de que el contacto del relay de salida se utilice, entonces el parámetro "T" debe estar configurado para ser mayor o igual que 4 segundos, ya que un pequeño conjunto de valores reducirá la vida útil de los contactos mecánicos. Un gran valor fijado, incrementará la vida útil del relay, pero disminuirá el control de precisión, así que debe seleccionarse un valor para satisfacer a ambas partes.
- En la función de la salida de corriente de línea, la disminución del parámetro T puede acelerar la producción y mejorar el rendimiento del control de precisión, pero dará lugar a un cambio de frecuencia de salida y de allí derivados con frecuente circulación de los comandos principales (por ejemplo, valor de control). Con un ajuste correcto, el parámetro "T" hará funcionar el valor sin problemas.

Especificación del parámetro de entrada "Sn"

Este instrumento está disponible con función de entrada variada. Diferentes tipos de entrada como de termopar y de RTD se pueden seleccionar en el mismo instrumento a través del ajuste de parámetros. La calibración automática no lineal de precisión para el termopar y RTD está disponible en el instrumento, con la entrada de medición de precisión de menos de 0.2% F.S. La siguiente especificación corresponde al valor del parámetro Sn.

Sn	Datos de entrada
0	K
1	S
4	E
5	J
20	Cu50
21	Pt100



Parámetro decimal de ajuste "diP"

En caso de la entrada del termopar o RTD, diP se utiliza para definir la resolución de la pantalla de temperatura.

diP = 0. La resolución de la pantalla de temperatura es de 1 °C.

diP = 1. La resolución de la pantalla de temperatura es de 0.1 °C.

El ajuste de este parámetro sólo afecta a la pantalla, no afecta en el control o la retransmisión de salida debido a que la medición interna de la temperatura se fija en 0.1 °C, entonces la temperatura se mostrará en la resolución de 0.1 °C para la entrada por debajo de 1000 °C y 1 °C para la entrada en 1000 °C.

"P-SH" y "P-SL": Escala lineal para la definición de parámetros de entrada / salida de retransmisión

Los Parámetros "P-SH" y "P-SL" se utilizan para definir la duración lineal de la pantalla de entrada y establecer la unidad para la medición. En caso del termopar o RTD los parámetros de entrada "P-SH" y "P-SL" no se utilizan.

Cambio del parámetro de entrada "Pb"

El parámetro Pb se utiliza para hacer turnos de entrada para compensar el error producido por el sensor o la señal de entrada.

Para el termopar de entrada, el parámetro Pb se utiliza para corregir errores de choques de compensación.

El instrumento en sí no produce el error después de un largo tiempo de estar en uso, porque la tecnología digital se utiliza para sustituir el potenciómetro o la mala estabilidad y la función automática de modulación cero, garantizara que no se tengan oscilaciones en los instrumentos.



El parámetro "Pb" se usa para hacer turnos de entrada para compensar el error producido por la medición. Por ejemplo, para de mantener sin cambios de señal de entrada, cuando el parámetro "Pb" está ajustado a 0.0 °C, la medición de la temperatura del instrumento es 500.0 °C, cuando el parámetro "Pb" está ajustado a 10.0 °C, la pantalla de medición de temperatura será 510.0 °C.

Definición de parámetros de salida "OP-A", "outL" y "outH"

El parámetro OP-A se utiliza para definir el modo de funcionamiento en el que se encuentra la señal principal de salida, los parámetros "outL" y "outH" se utilizan para definir el límite inferior de salida y el límite superior. Nota: El parámetro de configuración "OP-A" debe ajustarse a los tipos de módulo instalados en la salida principal.

OP-A=0. El principal modo de salida es proporcional el tiempo de salida del modo de desactivación (para el control on-off). En caso de módulos de salida, tales como SSR de salida de voltaje, contacto de relay de salida discreta, BCR de activación de salida de cero y BCR-n0 contacto ligero de salida se instalan como principal resultado y a continuación, "PO-A" deberá establecerse.

OP=1-A. Toda especificación DC de corriente de salida, el modo de salida continuo y la corriente lineal de salida del módulo, deben ser instalados a la salida principal.

PO=2-A. Es temporalmente proporcional a la salida del modo de desactivación.

outL. Restringe el valor mínimo de ajuste de la producción. Cuando la función de restricción de energía seccional es ejecutado. Si el límite superior de salida de la producción o si el valor es inferior al valor de umbral de alarma. Si el software de ajuste bidireccional es instalado, los instrumentos se convertirán en instrumentos de salida dual o bidireccional, cuando $outL < 0$, representa la potencia máxima de salida de la refrigeración.

outH. Restringe el valor máximo en el ajuste de salida.

Si una corriente de salida del módulo lineal se ha instalado en el instrumento como módulo de funciones auxiliares y a continuación, los parámetros "outL" y "outH" se utilizan para



definir la escala de la línea actual para la retransmisión de salida correspondiente. El parámetro "outL" se utiliza para definir el límite inferior de salida y el parámetro "outH" se utiliza para definir el límite superior. Por ejemplo, si una salida de 4-20 mA de retransmisión es necesario configurar de la siguiente manera: outL = 40, outH = 200.

Definición del parámetro de salida de alarma "AL-P"

Programa de instalación "AL-P" = 17

"ALM1" es el límite superior de alarma;

"ALM2" es el límite inferior de alarma;

"Hy-1" es la desviación positiva de alarma;

"Hy-2" es la desviación negativa de alarma.

Función parámetro "Cool"

El Parámetro "Cool" se utiliza para seleccionar algunas funciones del sistema.

Cool = 0. Modo de revertir la acción de control. Cuando se selecciona este modo, el aumento de los resultados del PV disminuirá en el control de salida. Por ejemplo: el control de calefacción.

Cool = 1. Acción directa del modo de control. Cuando se selecciona este modo, el aumento de los resultados del PV aumentará en el control de salida. Por ejemplo el control de refrigeración.

Interfaz de comunicación de los parámetros relacionados con "Addr" y "bAud"

Cuando las interfaces de comunicación RS232C o RS485 se instalan como auxiliares de la función, el parámetro "Addr" y "bAud" se utilizan para definir la dirección y la comunicación en bAud, respectivamente, para definir módulos de comunicación en el instrumento.



Filtro digital de parámetros de entrada "FILT"

Si la medición de entrada fluctúa debido al ruido, puede utilizarse el filtro digital para facilitar la entrada. El parámetro "FILT" se puede configurar en el rango de 0 a 20, entre los cuales, 0 significa que no hay filtro, 1 significa un valor intermedio y el filtro entre 2-20 significa que el valor de filtro y el filtro integral de segundo orden pueden ser seleccionados de manera simultánea.

Los múltiplos del segundo filtro integran del parámetro "FILT", pueden ser de hasta cientos. Cuando un valor grande se fija, la medición de entrada se estabiliza y la marcará en el momento en que se daño. Generalmente si existe una gran interferencia, se puede aumentar el parámetro "FILT" poco a poco para hacer una fluctuación momentánea de la medición de entrada de menos de 2 a 5 valores. Si el instrumento está siendo probado en laboratorio, el parámetro "FILT" puede acomodarse a 0 ó 1 por un corto tiempo.

Parámetro del sistema "A-M"

El parámetro A-M se utiliza para definir el control de trabajo como se muestra a continuación.

A-M = 0. Estado de control manual.

A-M = 1. Estado de control automático.

A-M = 2. En este estado manual de operación está prohibido el control automático.

Privilegios para el conjunto de parámetros "Lock"

Si el parámetro de bloqueo se establece en otros valores de 808, entonces sólo los parámetros en el rango de 0 a 8 y el parámetro de Lock se pueden configurar de manera electrónica. Cuando el parámetro de Lock se establece en 808, el usuario puede configurar los otros parámetros.

El parámetro de operación Lock ofrece varios privilegios. Como son:

Lock = 0. Se permite la modificación de campo y punto de ajuste de parámetros.



- Lock = 1.** Ver los parámetros de campo y punto de ajuste en la pantalla. Pero no está permitida la modificación de los parámetros de campo (salvo el mismo parámetro Lock).
- Lock = 2.** Ver los parámetros de campo en la pantalla. Pero no esta permitida la modificación del campo y el punto de ajuste de parámetros (excepto el mismo parámetro Lock).
- Lock = 808.** Todos los parámetros de configuración de punto de ajuste están permitidos. Al establecer Lock en otros valores que el anterior, el resultado puede ser uno de los de arriba mencionados y la mayoría de ellos son los mismos que cuando bloqueo = 1 está configurado. Si el conjunto de bloqueos es 808 durante el establecimiento de campo de parámetros (EP1 – EP8), el parámetro de bloqueo se activa automáticamente a 0 cuando se hayan terminado de configurar los parámetros de campo, pero si establece Lock a 808 después de que los parámetros se desbloquean, el parámetro de Lock se guardan automáticamente como 808.

Definición de parámetros de campo: " EP1 – EP8"

Los valores de los parámetros EP1 – EP8 son definidos en su totalidad, exceptuando el parámetro propio EP como ALM1, ALM2, etc. Cuando el Lock está establecido en 0, 1, 2, y así sucesivamente, sólo los parámetros o valores de configuración del programa definido podrán ser visualizados, otros parámetros no se pueden mostrar ni modificar. Esta función puede acelerar la modificación de parámetros y evitar que los parámetros importantes (como los parámetros de entrada, de salida) se modifiquen de forma falsa.

Los parámetros de campo EP1 a EP8 campo puede definir 8 parámetros como máximo, si el número de parámetros de campo es menor o mayor de 8, (a veces incluso ninguna), es necesario definir parámetros útiles de EP1 a EP8 en orden; por ejemplo, dos parámetros de ALM1 y ALM2 son necesarios para ser modificados por los operadores de campo y los parámetros del EP se puede configurar de la forma siguiente:

Lock=0, EP1=ALM1, EP2=ALM2, EP3=ninguno.



Algunas veces los parámetros de campo no son necesarios después de ajustar el instrumento, en su lugar se pueden utilizar parámetros EP1 o ninguno.

Observaciones adicionales del tiempo proporcional de salida (cuando OP-A = 0)

En caso de que el modo de salida de tiempo proporcional este activado, el valor de salida puede ser cambiando a través de un ajuste, durante un período de reparación de base, la relación del relay de tiempo on-off (o la relación de tiempo durante el cual la SSR de alta tensión de salida o de bajo voltaje de salida es activado).

El tiempo proporcional de salida puede ser considerado como una onda cuadrada, el período de base de los cuales equivale a período de control "T" y el valor de salida el cual es directamente proporcional a la relación on-off de la onda cuadrada. La relación on-off puede ser configurada para estar en el rango de 0% a 100%. Para aplicaciones especiales, el intervalo del tiempo proporcional de salida puede ser fijado por parámetros de sintonización "outL" y "outH". Por ejemplo, si la salida debe ser ajustada entre el 20% y 60%, entonces puede ser establecido "outL = 20 y outH = 60". Normalmente, en caso de salida de tiempo proporcional, si " outL = 0, outH = 100" se establece, entonces no habrá límite de salida.

Descripción general sobre el modo de trabajo

Instrumento de control ON-OFF (instrumento simple de temperatura)

La banda inactiva de control ON-OFF se puede fijar mediante el parámetro Hy. Cuando los instrumentos se utilizan para el control ON-OFF, se debe establecer como: At = 0, OP-A = 0.

Los parámetros para el control de la inteligencia artificial, como I, P, t y T, no tienen ninguna función en esta ocasión.

Lock = 1. Al inhibir la modificación de los parámetros de campo, impiden la visualización y la modificación de otros parámetros.

EP1 = ninguno. Parámetros de campo no definidos.



Punto 3 (superior, inferior alarma) instrumento de control

Para hacer que el instrumento supere la función de alarma inferior, los parámetros deberán establecerse como:

At=0, OP-A=2, COOL=0, AL-P=17, Lock=0, EP1=ALM1, EP-2=ninguno.

Transmisor de temperatura

El instrumento puede retransmitir su señal de entrada analógica lineal en una corriente de salida de cualquier rango, puede ser utilizado como un instrumento con la pantalla y la función de la temperatura de retransmisión. Se pueden configurar varios termopares / RTE de entrada, cualquier rango de temperatura de la retransmisión y la especificación de salida de corriente, con la precisión de los instrumentos de retransmisión de 0.1 mA en el rango de 0-20 mA (es decir, menos de 0.5% FS). Los parámetros relacionados con el son:

Sn: Selección en la especificación de entrada el termopar / RDT

A = 0 (ON-OFF del modo de control)

OP-A = 1. (Corriente de salida lineal)

outL. Límite inferior de salida, la unidad es de 0.1 mA.

OutH: Límite superior de salida, la unidad es de 0.1 mA.

Por ejemplo, si el instrumento detecta la función para la retransmisión de termopar tipo K, con el rango de temperatura de 0 a 400 °C, rango de salida de 4 a 20 mA, entonces cada uno de los parámetros se puede programar de la siguiente forma: Sn=0, At=0, OP-A=1, outL=40, outH=200.

El transmisor se define como la producción por encima de 4 mA cuando la temperatura es inferior o igual a 0 °C, 20 mA cuando la temperatura es superior o igual a 400 °C y un continuo cambio entre 0 y 400 °C.



4.3.5 ELECTROVÁLVULAS E INSTALACIÓN ELÉCTRICA

Las electroválvulas y los dispositivos de la instalación eléctrica se encuentran montados sobre una lámina de acero galvanizado. El plano de la instalación eléctrica podrá consultarse en los Anexos de éste trabajo.



FIGURA 4.3.11
ELECTROVÁLVULAS E INSTALACIÓN ELÉCTRICA

ELECTROVÁLVULA DE 3/2 VÍAS, 5/2 y 5/3 VÍAS

Son válvulas elaboradas con una fundición inyectada de aluminio. Su funcionamiento es eléctrico, accionadas con aire comprimido seco, filtrado, con o sin lubricación.

Cuenta con unos canales PRS cerrados en bloques básicos y bloques de ampliación, gracias a los cuales cuenta con diferentes zonas de presión. En aire de alimentación y el de escape pueden conectarse en ambos lados con racores en los bloques básicos y los bloques finales.



CONTACTOR

Es un interruptor de corriente eléctrica accionado a distancia por medio de un electroimán.



El contactor esta formado por las siguientes partes:

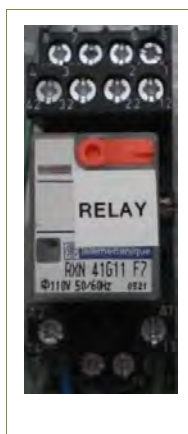
- **Carcasa.** Es el soporte fabricado en material no conductor, con un alto grado de rigidez al calor, sobre el cual se fijan todos los componentes conductores del contactor.
- **Electroimán.** Es el elemento motor del contactor. Está compuesto por una serie de elementos cuya finalidad es transformar la energía eléctrica en magnetismo, generando un campo magnético muy intenso, el cual a su vez producirá un movimiento mecánico.



- **Bobina.** Es un arrollamiento de alambre de cobre muy delgado y un gran número de espiras, que al aplicársele tensión genera un campo magnético. El flujo magnético produce un campo electromagnético superior al par resistente de los resortes que separan la armadura del núcleo, de manera que estas dos partes pueden juntarse estrechamente. Cuando una bobina se energiza con Corriente Alterna (C.A.) la intensidad absorbida por esta, denominada corriente de llamada, es relativamente elevada, debido a que en el circuito prácticamente solo se tiene la resistencia del conductor. Esta corriente elevada genera un campo magnético intenso, de manera que el núcleo puede atraer a la armadura, a pesar del gran entrehierro y la resistencia mecánica del resorte o muelle que los mantiene separados en estado de reposo. Una vez que se cierra el circuito magnético, al juntarse el núcleo con la armadura, aumenta la impedancia de la bobina, de tal manera que la corriente de llamada se reduce considerablemente, obteniendo de esta manera una corriente de mantenimiento o trabajo mucho más baja.
- **Núcleo.** Es una parte metálica, de material ferromagnético, generalmente en forma de E, que va fijo en la carcasa. Su función es concentrar y aumentar el flujo magnético que genera la bobina para atraer con mayor eficiencia la armadura.
- **Armadura.** Elemento móvil, cuya construcción se parece a la del núcleo, pero sin espiras de sombra, Su función es cerrar el circuito magnético una vez energizada la bobina, ya que en este estado de reposo debe estar separado del núcleo, por acción de un muelle. Las características del muelle permiten que, tanto el cierre como la apertura del circuito magnético, se realicen en forma muy rápida (10 milisegundos). Cuando el par resistente del muelle es mayor que el par electromagnético, el núcleo no lograra atraer la armadura o lo hará con mucha dificultad. Por el contrario, si el par resistente del muelle es demasiado débil, la separación de la armadura no se producirá con la rapidez necesaria.

RELAY

Es un dispositivo electromecánico, que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de un **electroimán**, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes.



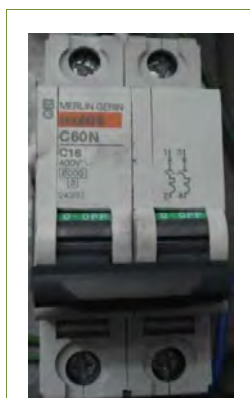
**FIGURA 4.3.15
RELAY**

Es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada, puede considerarse, en un amplio sentido, una forma de amplificador eléctrico.

Separa la corriente eléctrica de accionamiento (la que circula por la bobina del electroimán) y los circuitos controlados por el contactor, lo que hace que se puedan manejar altos voltajes o elevadas potencias con pequeñas tensiones de control.

DISYUNTOR

Es un interruptor automático capaz de abrir el circuito magnético cuando la intensidad que circula por él excede de un determinado valor, con el objetivo de causar daños eléctricos al equipo.



**FIGURA 4.3.16
DISYUNTOR**



Capítulo 4. Descripción del Prototipo "Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH"

A diferencia de los fusibles, que se reemplazan tras un único uso, el disyuntor puede ser rearmado una vez localizado y reparado el daño que causó la desactivación automática. Además, está provisto de una palanca que permite la desconexión manual de la corriente y el rearme del dispositivo automático cuando se ha producido una desconexión.

Su funcionamiento se basa en dos de los efectos producidos por la circulación de corriente eléctrica en un circuito, están formados internamente por:

- **Parte Térmica:** Compuesta por un bimetálico, que al calentarse se va dilatando y permite que el interruptor se cierre automáticamente. Detecta principalmente las fallas de sobrecarga.
- **Parte Magnética:** La forma una bobina, que detecta las fallas de corto circuito que pueden haber en un circuito.

Además cuenta con las siguientes piezas especiales:

- **Racor rápido roscado en L, girable 360°.** Temperatura hasta los 80° C, a él se conecta fácilmente el tubo flexible que alimentará a las electroválvulas.
- **Conector para bobinas y válvulas.** Conector tipo zócalo, el cual es fijado a la electroválvula, para un diámetro de cable de 6 a 8 mm, con una tensión de funcionamiento nominal AC de 250 V.
- **Silenciadores.** Sirven para reducir el nivel de ruido en los escapes de las electroválvulas, el cuerpo está hecho de poliacetal y núcleo de polietileno, trabajan de 0-10 bars.





4.3.6 VELOCIDAD DEL DESPLAZAMIENTO

De acuerdo a la Norma Española NLT – 173 / 00, el carretón móvil debe tener un movimiento de vaivén con una frecuencia de 42 ± 1 pasadas por minuto y un recorrido en cada sentido de 23 ± 0.5 cm. La velocidad del desplazamiento es controlado por medio de 2 válvulas de estrangulación y antiretorno (Fig 4.3.22), por medio de ellas se cierra el paso del aire que hace posible el movimiento del carro de desplazamiento.

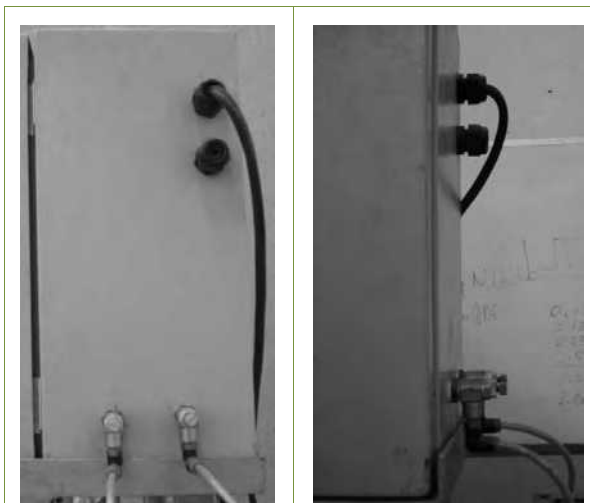


FIGURA 4.3.21
**VISTA FRONTAL Y LATERAL DEL CONTROL
DE LA VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO**
FUENTE: <WWW.FESTO.COM>

Para obtener la frecuencia adecuada, fue necesario abrir las válvulas poco a poco, verificando constantemente la velocidad hacia ambos lados del carro de desplazamiento.



FIGURA 4.3.22
**VÁLVULA DE ESTRANGULACIÓN
Y ANTIRRETORNO**
FUENTE: <WWW.FESTO.COM>



4.3.7 CARRO DE DESPLAZAMIENTO

Como se mencionó anteriormente, la máquina consiste en un carretón móvil de forma rectangular, soportado en cuatro puntos por un sistema horizontal – vertical de ruedas metálicas.

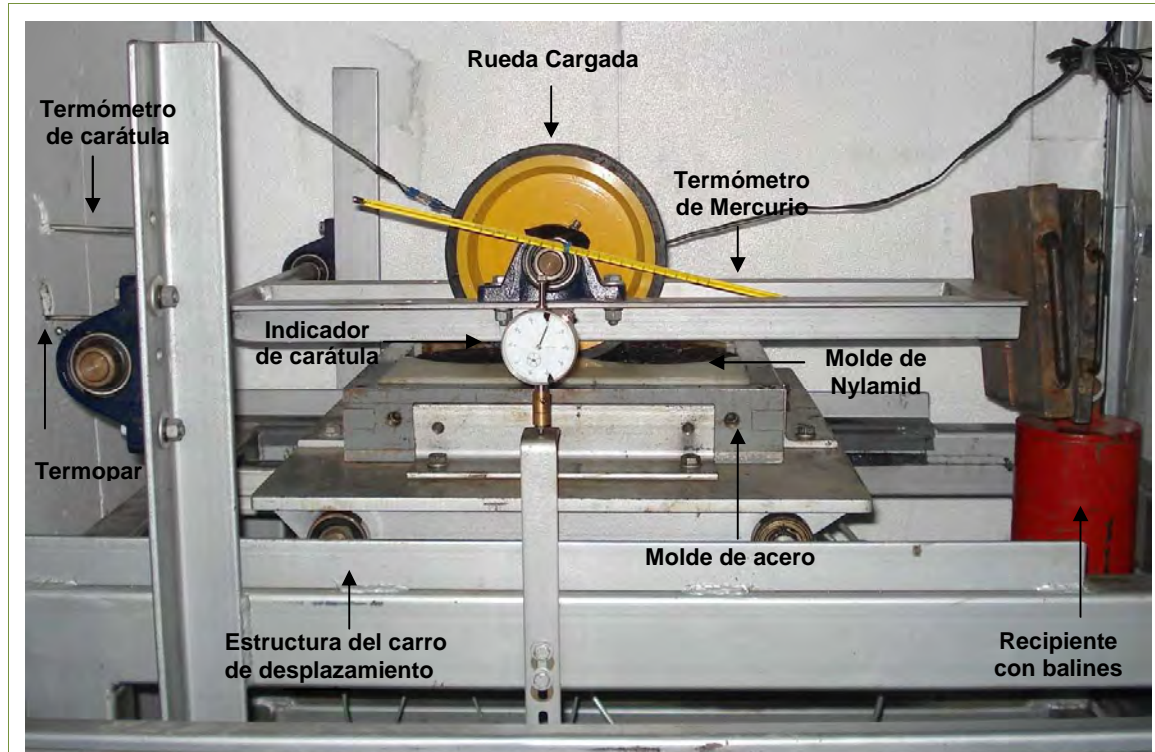


FIGURA 4.3.23
PARTES DEL CARRO DE DESPLAZAMIENTO

Básicamente, el carro de desplazamiento contiene las siguientes unidades:

- Actuador lineal.
- Detectores de posición.
- Estructura del carro de desplazamiento.
- Moldes.
- Rueda cargada.
- Sistema de medición de la deformación máxima.



ACTUADOR LINEAL

El carretón está unido a un actuador lineal alimentado por aire comprimido, el cual al estar en funcionamiento produce un movimiento alternativo horizontal de vaivén.

El actuador lineal sin vástago tiene la toma de aire comprimido por uno de sus lados, tiene una amplitud de desplazamiento de 10 a 300 mm, cuenta con amortiguación de final de la carrera, la cual es ajustable por ambos lados mediante unos detectores de posición, los cuales son colocados dentro de unas ranuras.



FIGURA 2.3.24
ACTUADOR LINEAL
FUENTE <WWW.FESTO.COM>

Para la correcta fijación del actuador lineal a la estructura del equipo, fue necesario utilizar unos pies de fijación.

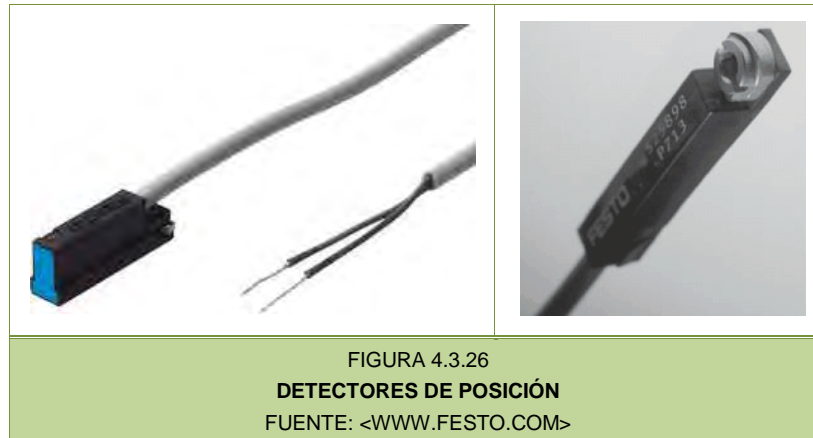


FIGURA 2.3.25
PIES DE FIJACIÓN
FUENTE <WWW.FESTO.COM>



DETECTORES DE POSICIÓN

Son detectores de proximidad eléctrica, los cuales se montaron en el actuador lineal para delimitar el desplazamiento del vástago. El contacto interno, tipo Reed, es activado eléctricamente y se encarga de cerrar un circuito eléctrico.



Los detectores se montaron en el actuador mecánicamente y a continuación, se procedió a su fijación en la posición deseada mediante unos tornillos. Una vez que el émbolo del actuador llega a esa posición, cambia el estado de conmutación.

ESTRUCTURA DEL CARRO DE DESPLAZAMIENTO

Está conformada por los siguientes componentes:

- Perfiles metálicos de acero.
- Chumaceras, cuya función es la sujeción de la palanca a la estructura, así como la de la rueda metálica al brazo.



MOLDES

Para la realización de los ensayos fue necesario realizar algunos moldes, cuyas dimensiones podrán consultarse en los anexos de este trabajo. Actualmente se cuenta con los siguientes moldes:

- 2 moldes de acero de 300 x 300 x 50 mm, para el ensayo de probetas de estas dimensiones.
- 1 molde para el ensayo de 3 probetas de 4".
- 1 molde para el ensayo de 2 probetas de 6".

Los moldes para las probetas de 4" y 6" son colocados dentro del molde de acero. Fueron elaborados mediante un torno con un material conocido con el nombre de Nylamid®; es un plástico ligero, maleable, rígido (pero más blando que el metal), que sirve para hacer prototipos de piezas mecánicas.



RUEDA CARGADA

La rueda de ensayo está montada en un brazo sustentador, para poder aplicar la carga necesaria a las probetas, en uno de los extremos del brazo se colocó un recipiente de acero el cual será llenado con balines de acero, con los cuales se pueden producir las diferentes cargas sobre la rueda, la Norma Española NLT – 173 / 00 establece una carga equivalente de $9 \pm 0.25 \text{ kg-f/cm}^2$.



SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA DEFORMACIÓN MÁXIMA

La medición de la deformación máxima se realiza mediante un indicador de carátula, el cual está unido con un perfil en L al brazo que sujeta la rueda de ensayo.

Para evitar la regresión del husillo, se le colocó al vástago un adaptador, el cual está sujeto a él mediante un opresor, dentro del adaptador de bronce se colocaron 2 o-ring, con los cuales se impide la regresión del husillo.

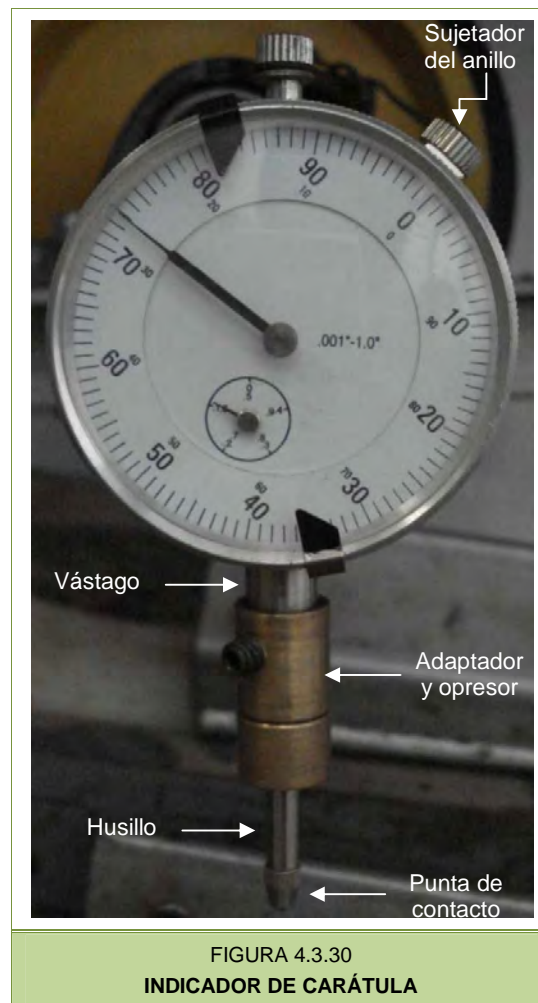


FIGURA 4.3.30
INDICADOR DE CARÁTULA

Las lecturas del indicador de carátula son tomadas de forma manual en los intervalos de tiempo mencionados anteriormente.



4.3.8 CÁMARA TERMOSTÁTICA

Para lograr una temperatura de 60° C se colocaron en la parte superior de la cámara 2 resistencias eléctricas de 1000 W, a 127 Volts C.A., para mantener la temperatura constante y tratando de que no existiera pérdida de calor, se colocaron materiales aislantes en las paredes de la cámara, así mismo en el piso sobre el cual está anclada la estructura del carro de desplazamiento.

Para que la temperatura dentro de la cámara fuese homogénea se colocó un ventilador, de manera que el aire caliente pudiera circular en toda la cámara.

A continuación se muestra una vista frontal y lateral de la cámara termostática, antes de que se colocara el material aislante y de que se buscara la posición ideal del ventilador para la homogenización de la temperatura en el interior de la cámara.



FIGURA 4.3.31
CÁMARA TERMOSTÁTICA



4.4 PUESTA A PUNTO DEL PROTOTIPO

Una vez que se tenía completamente ensamblado el equipo se procedió a realizar su ajuste y puesta a punto, para lo cual se realizaron varios ensayos y monitorearon las siguientes variables:

- **Control de temperatura.** Al principio, se tuvieron varios problemas para poder mantener una temperatura homogénea y constante en el interior de la cámara termostática. Se trató de ubicar al termopar lo más cerca posible a las probetas, de manera que la temperatura que detectara fuese a la que estaban realmente sometidas las probetas. Se ubicó el ventilador en distintas posiciones, tratando de que el aire caliente circulara adecuadamente y la temperatura dentro de la cámara durante todo el ensayo fuera homogénea. Para localizar el lugar correcto, se fueron tomando mediciones en distintos puntos en el interior de la cámara.
- **Carga Equivalente.** Para poder aplicar la carga equivalente a $9 \pm 0.25 \text{ kg}\cdot\text{f}/\text{cm}^2$ a las probetas de ensayo lo primero que se realizó fue tomar las huellas de la superficie de contacto de la rueda cargada, se determinó que el área de contacto de la rueda con las probetas era de 9 cm^2 , por lo cual la carga que se debería aplicar a las probetas debía ser de 81 kg. Posteriormente se fue llenando el recipiente con pequeños balines de acero y se determinó que la carga que estos producían debido al brazo de palanca, una vez que se obtuvo esta información, se fue calculando el peso que faltaba para producir la carga equivalente a las probetas. Se verificó la carga total aplicada a las probetas con la celda de carga.
- **Velocidad y amplitud del desplazamiento.** Gracias a que la unidad de mantenimiento es capaz de lograr una presión constante durante el ensayo, se evitan los movimientos repentinos e imprevistos del carro de desplazamiento. El aire comprimido es regulado de forma manual mediante las válvulas estranguladoras, con las cuales se controla la velocidad de desplazamiento. La amplitud del desplazamiento es controlada por unos sensores que se ubican en el actuador lineal.



Cabe señalar que por lo general al regular la presión del aire comprimido es necesario ajustar los sensores, ya que si se cierran demasiado las válvulas, el desplazamiento del carro se reduce, debido a la falta de presión.

Además se observó que cuando existen variaciones en la presión del aire que es alimentado por el compresor, el actuador lineal presenta una ligera pausa en el regreso de su recorrido.

CAPÍTULO 5

ENSAYOS DE LABORATORIO





CAPÍTULO 5

ENSAYOS DE LABORATORIO

5.1 INTRODUCCIÓN

Cada vez son más utilizados los ensayos de simulación para predecir el comportamiento de las mezclas asfálticas ante la deformación permanente, para este estudio se decidió realizar ensayos en los 3 equipos con los que cuenta México para medir este parámetro, los cuales son:

- Prototipo “Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH”.
- Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA”, del IMT.
- Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”, de las empresas privadas SURFAX S.A de C.V. y SemMaterials México.

Cabe mencionar que el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey también cuenta con una Pista de Ensayo de Laboratorio.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

En general los ensayos consisten en someter a las probetas de mezcla asfáltica ya sean fabricadas en laboratorio o testigos procedentes de pavimentos a una carga predeterminada.

A continuación se presenta una tabla donde se pueden observar las características de los 3 distintos equipos donde se realizaron los ensayos de simulación.

CARACTERÍSTICA	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA”	RUEDA CARGADA DE HAMBRUGO “HWTD”	PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”
Presión sobre la probeta	690 kPa	1500 kPa	900 kPa
Mecanismo de carga	Rueda de acero sobre una manguera presurizada	Rueda de acero	Rueda de acero forrada con caucho
Condición del ensayo	Seco Saturado	Saturado	Seco
Temperatura del ensayo	60° C Seco 64° Saturado	50° C	60° C
No. Pasadas	8,000 en seco 10,000 saturado	20,000	5,040
Frecuencia (ciclos por minuto)	58	60	42
Deformación máxima permitida	14 mm	4 mm	15 µm/mim

TABLA 5.1.1
**CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS PARA ANALIZAR
LA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Aunque se realizaron ensayos en 3 equipos distintos con características particulares cada uno de ellos, se fabricaron pastillas con las mismas características granulométricas y mismos contenidos de asfalto, con lo cual se podría observar si el comportamiento de las probetas ante las deformaciones permanentes era similar.

Posteriormente se describirán las características más importantes, así como el procedimiento de cada uno de los ensayos realizados. En los anexos de éste documento podrán consultarse de forma completa los procedimientos de ensayo con los 3 equipos utilizados.



5.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

5.2.1 PÉTREOS

Lo primero que se realizó fue definir el banco de materiales que se utilizaría para la realización de las probetas asfálticas. El pétreo a analizar es un material triturado del municipio de Tarímbaro, Michoacán, el cual se utiliza en la construcción de pavimentos en la ciudad de Morelia y sus alrededores, éste material cumple con todas las normas para ser empleado en mezclas asfálticas, sin embargo, ha presentado problemas de afinidad en distintas obras.

El pétreo utilizado es una Andesita, fue suministrado por “Triturados, Acarreos y Concretos S.A. de C.V., dicho banco nos proporcionó pétreos con un T.M.A. de $\frac{3}{4}$ ” y $\frac{1}{2}$ ”, para lo cual se realizó la granulometría.



FIGURA 5.2.1

**BANCO DE TRITURADOS, ACARREOS, CONCRETOS S.A. DE C.V.
UBICADO EN EL KM 7.0 DE LA CARRETERA MORELIA –SALAMANCA**



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

En México la Secretaría de Comunicaciones y Transportes es el organismo encargado de regular las Normas de los materiales empleados en la construcción de pavimentos, así como sus métodos de muestreo, ensayos de caracterización, etc. Se evaluó la calidad de los materiales que se emplearían en las mezclas asfálticas, el cual cuenta con las características mostradas en la Tabla 5.2.1, las cuales cumplen con los valores establecidos en la Norma N-CMT-4-04/08 “Requisitos de Calidad del Material Pétreo para Carpetas Asfálticas de Granulometría Densa (para $\Sigma L > 10^6$)”.

CARACTERÍSTICA	VALOR OBTENIDO	VALOR ESTABLECIDO POR LAS NORMAS DE LA SCT
Desgaste de los ángeles	14.54 %	30 % Máximo
Partículas alargadas	16.14 %	35 % Máximo
Partículas lajeadas	24.85 %	35 % Máximo
Densidad relativa gr/cm ³	2.61	2.4 Mínimo
Equivalente de arena	83.97 %	50 % Mínimo

TABLA 5.2.1
CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PÉTREO UTILIZADO EN LOS ENSAYOS

De acuerdo a la normativa de la SCT se realizó el cuarteo y cribado del material pétreo, obteniéndose la granulometría de las muestras tomadas, se ajustó la curva granulométrica tratando de centrarla en los valores establecidos por la Norma N-CMT-4-04-/08 “Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”.

En la tabla 5.2.2 se puede observar el ajuste granulométrico del material pétreo utilizado en los ensayos y en la Figura 5.2.2 se pueden observar las gráficas de los límites granulométricos para carpetas asfálticas de Granulometría densa para cualquier valor de ΣL , así como la curva granulométrica utilizada para T.M.A de $\frac{1}{2}$ ”.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ABERTURA (mm)	MALLA	LÍMITES		CURVA AJUSTADA
25.400	1"	100	100	100.00
19.050	3/4"	100	100	100.00
12.700	1/2"	100	100	100.00
9.520	3/8"	90	100	90.00
6.350	1/4"	70	81	76.55
4.760	No. 4	56	69	60.00
2.000	No. 10	28	42	34.83
0.840	No. 20	18	27	23.32
0.420	No. 40	13	20	15.00
0.250	No. 60	10	15	10.72
0.149	No. 100	6	12	8.39
0.074	No. 200	2	7	5.07

TABLA 5.2.2

AJUSTE GRANULOMÉTRICO DEL MATERIAL PÉTREO UTILIZADO EN LOS ENSAYOS

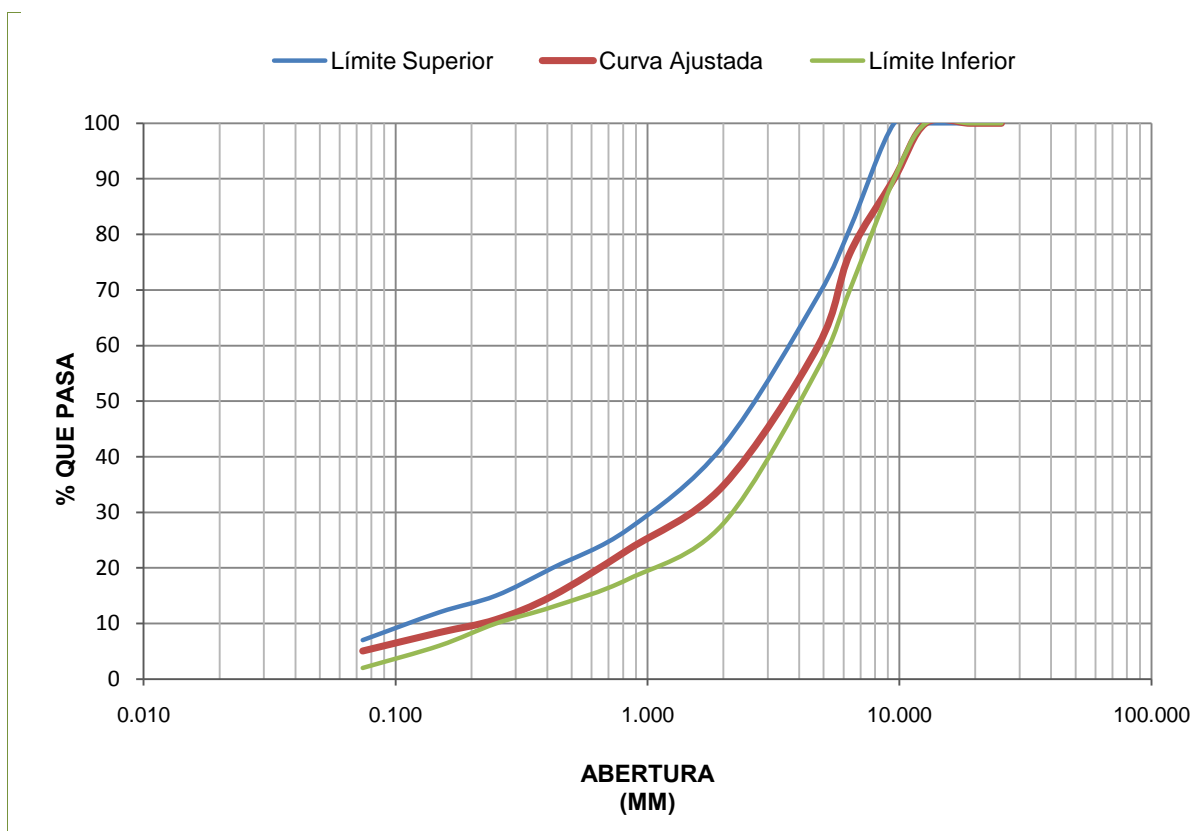


FIGURA 5.2.2

LÍMITES GRANULOMÉTRICOS PARA CARPETAS ASFÁLTICAS DE GRANULOMETRÍA Densa
(PARA CUALQUIER VALOR DE ΣL Y LA CURVA GRANULOMÉTRICA UTILIZADA (T.M.A. 1/2"))



5.2.2 ASFALTO

Los asfaltos fueron proporcionados por la empresa SURFAX S.A. de C.V. de Guadalajara, Jalisco. Como se puede observar en el caso de Morelia se encuentra en la zona 3 de la Figura 2.2.2, del Capítulo 2 de este documento, por lo que para nuestro estudio utilizaremos un asfalto AC-20 de Salamanca, además, con el fin de realizar ensayos con un asfalto con mayor rigidez a una alta temperatura, se decidió utilizar un asfalto modificado con Terpolímero Elastomérico Reactivo.

En la Tabla 5.2.3 se muestran los asfaltos utilizados en la elaboración de las probetas y en la Tabla 5.2.4 se observan los resultados obtenidos de la caracterización reológica.

ASFALTO	TIPO	CLASIFICACIÓN*	PARTICULARIDADES
AC-20 de Salamanca	Virgen	PG 64-YY	Procedente de la refinería de Salamanca, Guanajuato
Asfalto con Terpolímero Elastomérico Reactivo.	Modificado	PG 82-YY	Modificado con Elvaloy 4170 y Ácido Polifosfórico como catalizador

* Esta clasificación fue obtenida mediante el método SUPERPAVE con asfalto envejecido en RTFO

TABLA 5.2.3
ASFALTOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES

CARACTERÍSTICA	ASFALTO AC – 20 DE SALAMANCA	ASFALTO MODIFICADO
Penetración 25° C, en mm	63 1/10	40 1/10 mm
Penetración 4° C	32	22
Reblandecimiento, en °C	50	55
Viscosidad Brookfield, en cP	403	1919
Después del RTFO		
Perdida de masa, en %	0.55	
Penetración 25° C	31	21
Penetración 4° C	20	13
Reblandecimiento, en °C	57	75
Viscosidad Brookfield	675	4575
PG, en °C	64-YY	82-YY
Temperatura de falla (T_{F1}), en °C	68.56	82.81
$G^* / \text{sen}(\delta)$, en kPa	3.72	2.34
Delta, en °	78	61.2

TABLA 5.2.4
RESULTADOS OBTENIDOS DE LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA POR EL MÉTODO SUPERPAVE



5.3 DISEÑO DE LA MEZCLA

Debido a la influencia que tiene el porcentaje de vacíos en el comportamiento de la deformación permanente de la mezcla asfáltica, para encontrar el contenido óptimo de asfalto se realizaron distintas probetas, con la finalidad de que a partir de sus propiedades volumétricas pudiéramos contar con un 5% de vacíos. Las variaciones que se tomaron en cuenta en la realización de las probetas fueron:

- Porcentaje de asfalto.
- Peso del material pétreo.
- Distintos números de giros en el proceso de compactación.

En la tabla 5.3.1 se muestran el número de probetas realizadas para determinar el contenido óptimo de asfalto y la cantidad de material pétreo para conseguir el porcentaje de vacíos deseado.

CONTENIDO ASFÁLTICO	GIROS DE COMPACTACIÓN	PRESIÓN DE COMPACTACIÓN		
		4" 300 KPa	4" 350 KPa	6" 600 KPa
7%	100	1000 grs. 1050 grs. 1100 grs. 1150 grs. 1200 grs.	850 grs. 900 grs. 950 grs. 1000 grs. 1050 grs. 1100 grs. 1150 grs. 1200 grs.	4100 grs.
6%	100		1000 grs.	
6%	150		1000 grs.	4500 grs.
7%	150			4100 grs.

TABLA 5.3.1
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS FABRICADAS
PARA ENCONTRAR EL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO



FIGURA 5.3.1

PROBETAS FABRICADAS PARA ENCONTRAR EL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

GRAVEDAD ESPECÍFICA TÉORICA MÁXIMA (G_{mm})

El peso específico máximo de una mezcla asfáltica sin vacíos con aire (no compactada), se determina por el método desarrollado por James Rice y su valor es necesario para conocer el porcentaje de asfalto absorbido por los agregados y el volumen real de los vacíos con aire que tendrá cuando se encuentre compactada.

Se desmenuza la mezcla sin partir las partículas, de tal manera que la porción del agregado fino no tenga más de 1/4". Se permite que la mezcla alcance la temperatura ambiente y se toma su peso en el aire como (A).

Se añade agua a 25°C tal que alcance a cubrir la muestra de ensayo. Se remueven las burbujas de aire atrapado, exponiendo el contenido del frasco a vacío parcial durante 15 ± 2 min. Se llena hasta la altura de calibración del frasco y se toma el peso como (E).

El frasco debe estar calibrado para determinar el peso del agua a 25°C. El peso del agua más el frasco se llama (D).

Una vez que se tienen estos pesos, se calculó el peso específico máximo con la siguiente expresión:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (E - D)}$$



5.4 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

Se elaboraron probetas de 4" y 6" con las siguientes características:

CARACTERÍSTICA	4"	6"
No. Mezclas	72	50
Energía de compactación	350 Kpa	600 Kpa
No. de giros	100	100
Peso del material pétreo	1000 gr	4200 gr
Contenido de asfalto	6%, 7%, 8%	6%, 7%, 8%

TABLA 5.4.1
CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS FABRICADAS

5.4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN

Una vez que se tenían definidas las características y granulometría que tendrían las mezclas, se separó el material en las siguientes 4 fracciones:

FRACCIONES	%
Pasa 1", Retiene 3/8"	10
Pasa 3/8" Retiene la No.4	30
Pasa No. 4, retiene la No.40	45
Pasa No.40	15

TABLA 5.4.2
FRACCIONES Y PORCENTAJES DEL MATERIAL PÉTREO
EMPLEADO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

A continuación se muestra el material separado en las distintas fracciones. En la elaboración de las pastillas de 6" se separó el material en 2 partes de 2,050 grs cada una, esto con el fin que en el proceso de mezclado pudiera ser homogéneo y que el material no se saliera de la vasija.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.4.1

FRACCIONES EN LAS QUE SE SEPARÓ EL MATERIAL PÉTREO
PARA LA ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE 4" Y 6"

Una vez que se tenían pesadas las fracciones del material pétreo, se colocaron en bolsas plásticas. La fracción que pasaba la malla No.4 se dejó separada de las otras 3 fracciones, ya que en el proceso de mezclado se incorporaría posteriormente.



FIGURA 5.4.2

FRACCIONES EN LAS QUE SE SEPARÓ EL MATERIAL PÉTREO
PARA LA ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE 4" Y 6"

Una vez que fueron separados los materiales en las distintas fracciones, se colocaron en el horno durante 2 hrs a la temperatura de mezclado, las cuales corresponden a -10°C de la temperatura de compactación. Posteriormente se mostrarán estas temperaturas para los 2 distintos tipos de asfalto utilizados.



5.4.2 PROCESO DE MEZCLADO

Se colocaron en el mezclador las 3 fracciones que estaban en las bolsas plásticas y el asfalto correspondiente a cada uno de los porcentajes, estos materiales se mezclaron durante 30 segundos para poder tener una mezcla homogénea, posteriormente se agregó la fracción que pasaba la malla No.4, se mezcló durante 1 minuto y se movió con la espátula el material, para permitir que todos los materiales se incorporaran se volvió a mezclar por 1 minuto, de manera que todas las partículas quedan perfectamente cubiertas.

Debido a la cantidad del material y para que la mezcla fuera lo más homogénea posible, las pastillas de 6" fueron separadas en 2 fracciones en el proceso de mezclado.

Una vez que fueron mezclados el material pétreo y el ligante asfáltico, se colocó la mezcla en unas charolas y se metieron en el horno para ser envejecidas a la temperatura de compactación durante 2 hrs, con lo cual se trata de simular el tiempo de traslado de la mezcla del lugar de fabricación al punto donde se colocaría. Para posteriormente ser compactada.



FIGURA 5.4.3
PROCESO DE MEZCLADO



En la Tabla 5.4.3 se muestran las temperaturas de mezclado y de compactación para los 2 tipos de asfaltos que se utilizaron.

TIPO DE ASFALTO	TEMPERATURA DE MEZCLADO	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN
AC-20 de Salamanca	155° C	145° C
Asfalto modificado	170° C	160° C

TABLA 5.4.3
TEMPERATURAS DE MEZCLADO Y DE COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS FABRICADAS

5.4.3 PROCESO DE COMPACTACIÓN

Para el proceso de compactación se empleó el compactador giratorio SUPERPAVE, ya que compacta de una forma similar a lo que se hace en campo, se utilizó un ángulo de giro de **1.25°**, una presión de **350 kPa** y **600 kPa** y un número de giros igual a **100**.

Se programó el compactador giratorio (Figura 5.4.4), identificando la muestra, junto con los siguientes parámetros:

- Nombre de la probeta.
- Número de giros.
- Porcentaje de vacíos.
- La masa de la mezcla asfáltica.
- Presión de compactación.
- Ángulo de giro.
- Densidad de la mezcla.
- Diámetro de la probeta.
- Altura de la probeta.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

Setup Information

End Point

Specimen Height mm

Revolution Number

Superpave Gyratory Compactive Effort

Header Information

Project Name

Specimen ID #

Percent Binder %

Mass of Specimen

Maximum Specific Gravity

Mold Diameter 100 mm 150 mm

Specimen Height Range

0 - 300 mm (Full Scale)

0 - 75 mm

50 - 125 mm

100 - 175 mm

150 - 225 mm

File Name

FIGURA 5.4.4
PANTALLA DEL COMPACTADOR GIRATORIO

Los moldes de 4" y 6" también se colocaron en el horno para que tuvieran la temperatura de compactación, pasando el proceso de oxidación de la mezcla (2 hrs), se sacó el molde del horno y se colocó papel filtro en el interior del mismo, para que la mezcla no se pegara en la base del molde, posteriormente se sacó la mezcla del horno y fue vaciada en el molde, colocando en la superficie nuevamente papel filtro, se introdujo el molde en el compactador, se ajustó manualmente el ángulo de giro a 1.25° por medio de una palanca y se inició el proceso de compactación.



Para la compactación de las probetas de 6" se colocaron las 2 mezclas de 2050 gr cada una. En la figura 5.4.5 se ilustra el proceso de compactación de las mezclas asfálticas.



FIGURA 5.4.5
PROCESO DE COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una vez que ha sido compactada la mezcla asfáltica, es extraída del molde mediante un sistema hidráulico y se deja enfriar a temperatura ambiente.

El software incorporado al Compactador Giratorio nos proporciona una lectura continua de la altura de la probeta utilizando un transductor de desplazamiento en el interior del Compactador y permite hacer un seguimiento continuo del proceso de compactación de la probeta.



En total se realizaron los siguientes números de probetas:

PROBETAS DE 4"	PROBETAS DE 6"
12 probetas con 6% de AC-20 de Salamanca	4 probetas con 6% de AC-20 de Salamanca
12 probetas con 7% de AC-20 de Salamanca	4 probetas con 7% de AC-20 de Salamanca
12 probetas con 8% de AC-20 de Salamanca	4 probetas con 8% de AC-20 de Salamanca
12 probetas con 6% de Asfalto modificado	4 probetas con 6% de Asfalto modificado
12 probetas con 7% de Asfalto modificado	4 probetas con 7% de Asfalto modificado
12 probetas con 8% de Asfalto modificado	5 probetas con 8% de Asfalto modificado
Total = 72 Probetas	Total = 25 Probetas

TABLA 5.4.4
NÚMERO TOTAL DE PROBETAS FABRICADAS PARA LOS DISTINTOS ENSAYOS

Como se puede observar para la realización de los ensayo se fabricaron en total 72 probetas de 4" y 24 probetas de 6", todas ellas fueron elaboradas en la empresa SURFAX S.A. de C.V. en Guadalajara, Jalisco.

5.4.4 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA COMPACTADA (G_{mb})

Una vez compactadas las mezclas asfálticas se dejaron enfriar hasta que alcanzaran la temperatura ambiente, para posteriormente calcular su gravedad específica o densidad, la cual es la relación entre su peso en el aire y su volumen incluyendo los vacíos permeables, se puede determinar con la siguiente expresión:

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

Dónde:

W_a = Peso de la probeta seca en el aire

W_w = Peso de la probeta sumergida en el agua

W_{ss} = Peso de la probeta saturada y superficialmente seca



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la figura 5.4.6 se puede observar el cálculo de dichas densidades.



FIGURA 5.4.6
CÁLCULO DE LAS DENSIDADES DE LAS PROBETAS

A pesar de que se había encontrado el contenido óptimo de asfalto, para un porcentaje de vacíos del 5%, en la densificación influye la compacidad del material pétreo, la imprecisión del ángulo de giro, así como el tamaño y forma de la partícula; es por ello, que no todas las probetas cuentan con el mismo porcentaje de vacíos. En las siguientes tablas 5.4.5 y 5.4.6 se muestran las características de las probetas elaboradas.

No. PROBETA	CONTENIDO ASFÁLTICO	AC-20 DE SALAMANCA				ASFALTO MODIFICADO			
		W_a	W_w	W_{ss}	G_{mb}	W_a	W_w	W_{ss}	G_{mb}
1	6%	4261.5	2363.5	4303.5	2.1966	4251.5	2356.5	4311.0	2.1752
2		4263.5	2363.0	4307.5	2.1926	4258.5	2365.0	4324.5	2.1733
3		4254.5	2352.0	4308.0	2.1751	4249.0	2364.0	4324.5	2.1673
4		4253.5	2351.0	4302.5	2.1796	4265.5	2364.5	4333.5	2.1663
5	7%	4297.5	2370.0	4312.0	2.2129	4298.5	2382.0	4324.5	2.2129
6		4300.5	2363.5	4315.0	2.2037	4298.5	2372.0	4323.5	2.2027
7		4292.5	2360.5	4309.5	2.2024	4296.0	2371.5	4324.5	2.1997
8		4302.5	2358.0	4318.5	2.1946	4298.5	2371.0	4334.5	2.1892
9	8%	4317.5	2407.0	4322.5	2.2540	4352.5	2433.5	4358.0	2.2616
10		4334.5	2407.5	4339.0	2.2441	4343.0	2425.5	4348.5	2.2585
11		4346.0	2416.0	4351.5	2.2454	4337.5	2419.0	4342.5	2.2550
12		4328.5	2408.5	4331.0	2.2515	4337.0	2417.5	4345.0	2.2501
13						4346.5	2416.0	4354.5	2.2422

TABLA 5.4.5
DENSIDADES DE LAS PROBETAS DE 6", ELABORADAS CON AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

No. PROBETA	CONTENIDO ASFÁLTICO	AC-20 DE SALAMANCA				ASFALTO MODIFICADO			
		W _a	W _w	W _{ss}	G _{mb}	W _a	W _w	W _{ss}	G _{mb}
1	6%	1035.0	561.5	1038.5	2.1698	1041.0	567.5	1051.5	2.1508
2		1040.0	570.5	1047.0	2.1826	1038.0	564.5	1042.5	2.1715
3		1038.0	569.0	1045.5	2.1784	1037.0	557.5	1042.0	2.1404
4		1038.5	565.5	1043.5	2.1726	1042.5	566.0	1048.0	2.1629
5		1037.5	569.5	1045.0	2.1819	1042.5	566.5	1047.0	2.1696
6		1037.5	567.5	1041.5	2.1888	1041.0	567.5	1046.5	2.1733
7		1034.0	567.0	1045.0	2.1632	1038.5	560.0	1041.5	2.1568
8		1036.5	570.0	1041.5	2.1983	1041.0	565.0	1048.0	2.1553
9		1042.0	569.5	1050.0	2.1686	1041.5	570.5	1049.5	2.1743
10		1041.5	569.5	1048.0	2.1766	1038.0	566.5	1046.0	2.1648
11		1033.5	569.0	1038.5	2.2013	1038.0	565.5	1045.5	2.1625
12		1039.5	569.5	1049.0	2.1679	1041.5	570.0	1052.0	2.1608
13	7%	1046.0	575.5	1049.0	2.2091	1052.0	579.0	1055.0	2.2101
14		1049.5	579.0	1051.5	2.2212	1048.5	579.5	1051.0	2.2238
15		1048.5	580.5	1050.5	2.2309	1049.5	579.5	1053.0	2.2165
16		1049.0	577.5	1050.5	2.2178	1047.0	579.0	1053.0	2.2089
17		1049.0	578.5	1051.0	2.2201	1041.5	568.5	1050.0	2.1630
18		1045.0	575.0	1047.0	2.2140	1052.0	583.5	1056.5	2.2241
19		1049.0	576.0	1052.0	2.2038	1049.5	578.5	1053.0	2.2118
20		1045.5	575.5	1049.0	2.2080	1050.0	579.0	1054.0	2.2105
21		1054.5	590.0	1055.0	2.2677	1049.0	577.5	1053.0	2.2061
22		1047.0	577.5	1049.0	2.2206	1049.5	577.0	1056.5	2.1887
23		1047.0	576.5	1050.5	2.2089	1045.5	573.5	1050.0	2.1941
24		1052.0	578.0	1054.5	2.2078	1046.5	571.5	1049.0	2.1916
25	8%	1056.0	591.0	1056.0	2.2710	1059.5	589.0	1061.0	2.2447
26		1057.5	590.0	1058.0	2.2596	1056.5	584.0	1058.0	2.2289
27		1057.5	593.0	1059.0	2.2693	1059.0	587.5	1060.0	2.2413
28		1057.0	588.5	1058.0	2.2513	1054.0	584.5	1055.5	2.2378
29		1055.0	592.5	1055.5	2.2786	1059.5	589.0	1061.0	2.2447
30		1059.5	592.5	1060.0	2.2663	1057.0	585.5	1059.5	2.2300
31		1053.0	585.5	1053.5	2.2500	1057.5	585.0	1059.0	2.2310
32		1061.0	594.5	1061.5	2.2719	1058.0	587.0	1059.5	2.2392
33		1058.5	589.5	1059.5	2.2521	1059.5	588.0	1060.5	2.2423
34		1057.5	590.0	1058.0	2.2596	1051.0	585.0	1052.5	2.2481
35		1058.5	591.0	1059.5	2.2593	1059.0	586.5	1060.5	2.2342
36		1058.5	591.0	1058.5	2.2642	1057.5	587.5	1058.5	2.2452

TABLA 5.4.6
DENSIDADES DE LAS PROBETAS DE 4", ELABORADAS CON AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

Las probetas de 6” fueron cortadas en 2, cada una de 5 cm, una mitad se ensayo en la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD” y la otra en el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA”. Para la realización de los ensayos en los distintos equipos se clasificaron las probetas en función de las densidades obtenidas, tratando de que tuvieran un porcentaje similar de vacíos. En la tabla 5.4.7 se puede observar la clasificación de las probetas de 6” y en la Tabla 5.4.8 la clasificación de las probetas de 4”.

CONTENIDO ASFÁLTICO	EQUIPO DE ENSAYO	AC-20 DE SALAMANCA			ASFALTO MODIFICADO		
		PROBETA	G _{mb}	% V _{VA}	PROBETA	G _{mb}	% V _{VA}
6%	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	1	2.1966	6.63923	4	2.1752	7.54931
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT	2	2.1926	6.81157 7.36363	1	2.1733	7.63338 7.88645
	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX				3	2.1673	7.92793
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	4	2.1796	7.55502	2	2.1663	7.54931
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT	3	2.1751	6.63923	8	2.2129	4.80126
	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX				6	2.2037	5.19621
7%	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	5	2.2129	4.79890	6	2.2027	5.24030
	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX	7	2.2024	5.25119			
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT	8	2.1946	5.58753	7	2.1997	5.36815
	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SEMMATERIALS				5	2.1892	5.81943
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"UMSNH	9	2.2540	1.88440	12	2.2616	1.55159
	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX	12	2.2515	1.99259			
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT	11	2.2454	2.25728	9	2.2501	2.05486
RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX	10	2.2441	2.31404	10	2.2550	1.83986	
PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"				13	2.2422	2.39732	
8%	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SEMMATERIALS	11	2.2585	1.68984	10	2.2550	1.83986
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT	10	2.2441	2.31404			
	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX	12	2.2616	1.55159	9	2.2501	2.05486
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	9	2.2501	2.05486			
	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SEMMATERIALS	10	2.2441	2.31404	10	2.2550	1.83986
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT	11	2.2454	2.25728	13	2.2422	2.39732
	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX	10	2.2441	2.31404			
	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX	12	2.2616	1.55159	13	2.2422	2.39732

TABLA 5.4.7

CLASIFICACIÓN DE LAS PROBETAS DE 6” DE ACUERDO AL PORCENTAJE DE VACÍOS Y AL EQUIPO UTILIZADO



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

CONTENIDO ASFÁLTICO	EQUIPO DE ENSAYO	AC-20 DE SALAMANCA			ASFALTO MODIFICADO		
		PROBETA	D _{MB}	% V _{VA}	PROBETA	D _{MB}	% V _{VA}
6%	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	11	2.2013	6.44251	9	2.1743	7.58820
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	8	2.1983	6.56894	6	2.1733	7.63257
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	6	2.1888	6.97206	2	2.1715	7.70608
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT	2	2.1826	7.23715	10	2.1648	7.99479
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT	5	2.1819	7.26552	4	2.1629	8.07520
	NO SE UTILIZÓ	3	2.1784	7.41554	5	2.1696	8.98721
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	10	2.1766	7.49164	11	2.1625	8.09063
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	4	2.1726	7.66162	12	2.1608	8.16338
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	1	2.1698	7.77989	7	2.1568	8.33282
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SATURADO. IMT	9	2.1686	7.83246	8	2.1553	8.39751
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SATURADO. IMT	12	2.1679	7.86184	1	2.1508	8.58678
	NO SE UTILIZÓ	7	2.1632	8.06174	3	2.1404	9.03200
	7%	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	21	2.2677	2.44064	18	2.2241
PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"		15	2.2309	4.02770	14	2.2238	4.33302
PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"		14	2.2212	4.44444	15	2.2165	4.64625
ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT		22	2.2206	4.46989	20	2.2105	4.90208
ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT		17	2.2201	4.48997	13	2.2101	4.92111
NO SE UTILIZÓ		16	2.2178	4.59093	19	2.2118	4.84721
PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"		18	2.2140	4.75337	16	2.2089	4.97374
PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"		13	2.2091	4.96425	21	2.2061	5.09256
PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"		23	2.2089	4.97374	23	2.1941	5.60773
ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SATURADO. IMT		20	2.2080	5.00968	24	2.1916	5.71531
ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SATURADO. IMT		24	2.2078	5.02088	22	2.1887	5.83942
NO SE UTILIZÓ		19	2.2038	5.19225	17	2.1630	6.94530



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

CONTENIDO ASFÁLTICO	EQUIPO DE ENSAYO	AC-20 DE SALAMANCA			ASFALTO MODIFICADO		
		PROBETA	D _{MB}	% V _{VA}	PROBETA	D _{MB}	% V _{VA}
8%	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	29	2.2786	0.81196	34	2.2481	2.13916
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	32	2.2719	1.10226	36	2.2452	2.26563
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	25	2.2710	1.14496	25	2.2447	2.28824
	NO SE UTILIZÓ	27	2.2693	1.21698	29	2.2447	2.28824
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT	30	2.2663	1.34770	33	2.2423	2.39164
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SECO. IMT	36	2.2642	1.44082	27	2.2413	2.43771
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	26	2.2596	1.63913	32	2.2392	2.52983
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	34	2.2596	1.63913	28	2.2378	2.58910
	PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"	35	2.2593	1.65119	35	2.2342	2.74645
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SATURADO. IMT	33	2.2521	1.96507	31	2.2310	2.88420
	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA". EN SATURADO. IMT	28	2.2513	1.99974	30	2.2300	2.93012
	NO SE UTILIZÓ	31	2.2500	2.05768	26	2.2289	2.97604

TABLA 5.4.7

CLASIFICACIÓN DE LAS PROBETAS DE 4" DE ACUERDO AL PORCENTAJE DE VACÍOS Y AL EQUIPO UTILIZADO

Como se puede observar en general las probetas fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca, son más densas que las elaboradas con Asfalto modificado, por consiguiente tienen menor porcentaje de vacíos.



5.5 ENSAYO DE LAS PROBETAS

Aunque se realizaron ensayos en 3 equipos distintos con características particulares, se fabricaron probetas con las mismas características granulométricas y con los mismos contenidos de asfalto, con lo cual se podría observar si el comportamiento de las pastillas antes las deformaciones permanentes podrían tener alguna relación.

En la Tabla 5.5.1 se mostrarán las características resumidas a las que fueron sometidas las probetas en cada uno de los ensayos para evaluar su resistencia a la deformación permanente.

CARACTERÍSTICA	PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”	ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA”	RUEDA CARGADA DE HAMBURGO “HWTD”
Temperatura del ensayo	60° C	64° C	60° C
Condición del ensayo	Seco	Seco Saturado	Saturado
No. Pasadas	5,040	8,000 en seco 10,000 saturado	20,000

TABLA 5.5.1

CARACTERÍSTICAS A LAS QUE SE SOMETIERON LAS PROBETAS EN CADA UNO DE LOS ENSAYOS

Aunque el método de ensayo de la Rueda Cargada de Hamburgo “HDTW”, menciona que la temperatura de ensayo es de 50° C, se decidió cambiarla a 60° C, con el fin de que los ensayos que se realizarían tuvieran una temperatura similar, sobre todo en los realizados en saturado en el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA”.

A continuación se ilustrarán y se describirán en forma breve las características más importantes y el procedimiento de cada uno de los ensayos realizados, la Norma completa de cada uno de estos pueden ser consultadas en los anexos de este documento.

Además, debido a las incidencias que se tuvieron en algunos de los ensayos, se descartarán algunos por dudarse de la confiabilidad de los resultados.



5.5.1 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS ANTES DE SER ENSAYADAS

Antes de poder realizar los ensayos, fue necesario cortar las probetas a una altura de 5 cm, lo cual se hizo con una sierra húmeda, utilizando un disco de diamante para concreto hidráulico. Las probetas de 6" tenían en promedio 116 mm de altura, en ellas se realizaron 2 cortes, de manera que de cada probeta salieran 2, en las pastillas de 4" solo fue necesario realizar un corte, ya que tenían en promedio una altura de 6 cm. A continuación se ilustrará el proceso de corte de las pastillas



FIGURA 5.5.1
PROCESO DE CORTE DE LAS PROBETAS



5.5.2 ENSAYOS REALIZADOS EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

Para la realización de cada ensayo de 4” es necesario utilizar 3 probetas, considerando que se contaba con 3 porcentajes de asfalto, 2 tipos de asfalto y se realizaron 2 ensayos por variable, en total se utilizaron 36 probetas. Para los ensayos de 6” solo se necesitaban 2 probetas, se utilizaron las mismas variables, por lo cual se necesitaron únicamente 24 probetas, es necesario recordar que de cada una de las probetas de éste diámetro que se fabricaron inicialmente salieron 2 probetas.

Con éste ensayo es posible evaluar la resistencia a las deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas. La finalidad del ensayo es someter las probetas a un estado de esfuerzos similar a los producidos por los vehículos que circulan por nuestras carreteras.

El equipo está compuesto por una cámara termostática formada por unos perfiles metálicos de acero, dentro de la cámara se localiza el carro de desplazamiento sobre el cual se ubica el molde que contiene las probetas de ensayo sobre las cuales se aplica la carga que simula el peso de un eje equivalente de un vehículo, mediante una rueda metálica recubierta con goma, la profundidad de la deformación es tomada durante todo el ensayo de forma manual mediante un indicador de carátula. Una vez finalizado el ensayo se procedió a calcular la velocidad de la deformación, como se indica en la Norma NLT – 173 / 84.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

2 hrs antes de iniciar el ensayo se colocaron las probetas en el horno a una temperatura de 60° C, para que pudieran tener una temperatura homogénea.

Así mismo, se encendió la cámara termostática del equipo también a 60° C durante éste periodo se corroboró que la temperatura transmitida por el termopar fuera la que realmente se tenía en el interior del equipo, en caso contrario se ajustaba este valor mediante el parámetro PB, mencionado anteriormente en el Capítulo 3.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

Después de el proceso de precalentamiento de las probetas y el equipo, se procedió a colocar las probetas dentro de los moldes de acero de 30 x 30 cm y de Naylamid, en las ranuras que existen entre el los moldes y las probetas se colocó arena sílica, de manera que se tuviera una superficie correcta de confinamiento.

Se encendió el compresor, de manera que cuando se fuera a iniciar el ensayo se contara con suficiente presión para poder mantener una velocidad constante durante todo el ensayo.

Se colocó el molde con las probetas dentro de la cámara y se sujetó al carro de desplazamiento mediante unos ángulos de acero, se tuvo especial cuidado de que en ningún momento la rueda se apoyara sobre las probetas. Se cerró la cámara termostática y se esperó que se homogenizara nuevamente la temperatura durante 30 minutos. Una vez transcurrido éste tiempo, se apoyó la rueda metálica sobre las probetas, se cerró la cámara y se le dieron 3 pasadas para permitir el adecuado asentamiento de la rueda sobre las probetas, posteriormente se colocó el indicador de carátula en ceros y transcurridos 5 minutos se inició el ensayo, el cual dura 120 minutos, con una frecuencia de 42 ± 1 pasadas por minuto y a una temperatura de 60° C, estos parámetros fueron verificados constantemente durante todo el ensayo.

Se midió la deformación producida por la rueda sobre las probetas en los siguientes tiempos de ensayo:

- Minutos 1, 3 y 5 contados desde el inicio del ensayo.
- Posteriormente cada 5 minutos hasta llegar al minuto 45.
- Finalmente a partir del minuto 45 en intervalos de 15 minutos hasta llegar a los 120 minutos.

Con los datos obtenidos se elaboró la gráfica tiempo – deformación de cada ensayo. Posteriormente se calcularon las velocidades de deformación en los siguientes intervalos:

- En el intervalo entre 30 y 45 minutos.
- En el intervalo entre 75 y 90 minutos.
- En el intervalo entre 105 y 120 minutos.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

Las velocidades de deformación se calcularon mediante la siguiente expresión:

$$W_{t_2/t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{(t_2 - t_1)}$$

Dónde:

V_{t_2/t_1} = Velocidad media en el intervalo de tiempo

d_{t_2} = Deformación medida en el tiempo 2

d_{t_1} = Deformación medida en el tiempo 1

t_2 = Tiempo de la deformación 2

t_1 = Tiempo de la deformación 1

La velocidad V , de deformación media correspondiente al intervalo de tiempos t_2/t_1 , parámetro que vendrá expresado en 10^{-3} mm/min.

Terminado el ensayo se procedió a desatornillar el molde y a desmontar las probetas, para posteriormente tomar algunas fotografías y preparar el equipo para el siguiente ensayo. En la Figura 5.5.2 se ilustra el procedimiento realizado en el Prototipo “Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH”.



FIGURA 5.5.2

PROCEDIMIENTO EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se mencionarán los problemas que se tuvieron en cada uno de los ensayos, se mostrarán los resultados obtenidos y para el análisis de resultados los cuales se harán en el Capítulo 6, se descartarán ciertos ensayos por no haberse obtenido resultados confiables.

ENSAYO 1

Para éste ensayo se utilizaron las probetas 6, 8 y 11, de 4" correspondientes a un 6% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

Al realizar éste ensayo se tuvieron algunos problemas con el control de temperatura, ya que se incrementaba o disminuía en $\pm 10^{\circ}$ C y aunque se ajustaba el parámetro PB, no se logró mantener una temperatura constante, por ello después de 30 min se decidió parar el ensayo.

Cuando se logró corregir el problema del control de temperatura, se volvió a iniciar éste ensayo, para lo cual se voltearon las pastillas al revés. Además en éste ensayo no se colocó arena sílica entre las probetas y el molde de Naylamid, ya que aún no se contaba con ella.

ENSAYO 2

Éste ensayo es una réplica del ensayo 1, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizaron las probetas 1, 4 y 10, de 4" correspondientes a un 6% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

En la Tabla 5.5.2 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 1 y 2, en la Figura 5.5.3 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.4 las gráficas de tiempo – deformación.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

ENSAYO 1

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.635
3	0.9144
5	1.0668
10	1.3716
15	1.5494
20	1.651
25	1.7526
30	1.8542
35	1.905
40	1.9304
45	1.9812
60	2.159
75	2.286
90	2.3114
105	2.413
120	2.5146

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.508**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.1016**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.4064**

ENSAYO 2

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.2286
3	0.2667
5	0.508
10	0.7112
15	0.762
20	0.7874
25	0.8128
30	0.8382
35	0.8636
40	0.8636
45	0.889
60	0.9779
75	1.0795
90	1.143
105	1.2319
120	1.2954

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.2032**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.254**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.254**

TABLA 5.5.2

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 1 Y 2, EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”





Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

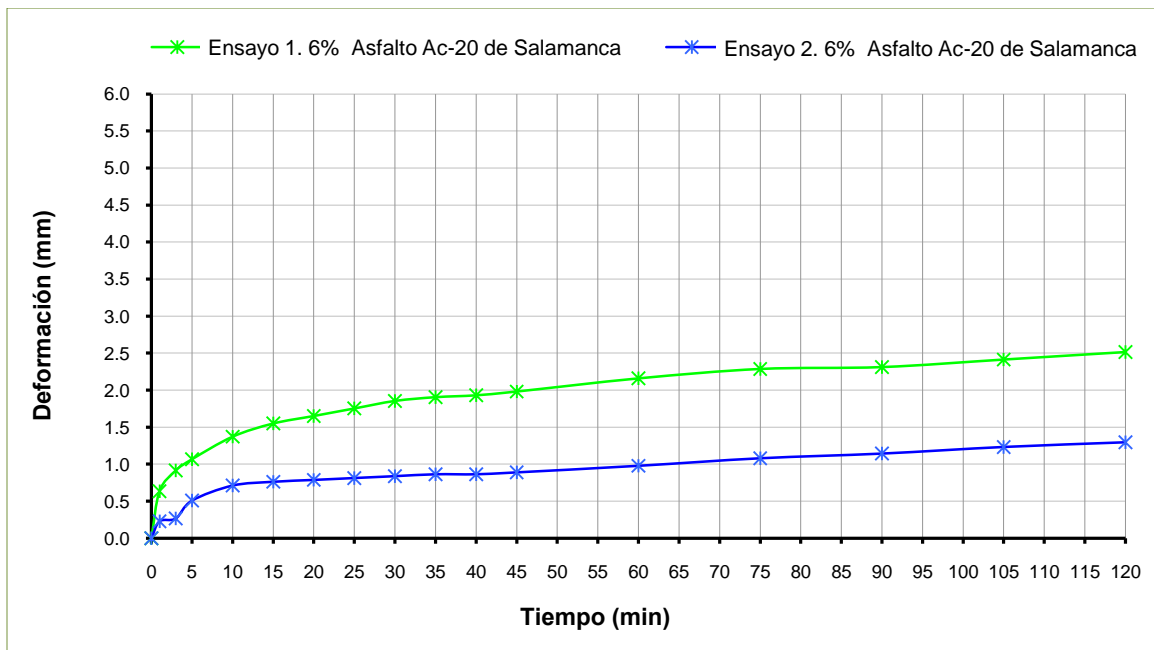


FIGURA 5.5.4
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 1 Y 2, REALIZADOS
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

Como se puede observar en la gráfica, existe una gran diferencia entre las deformaciones producidas en las probetas, esto puede deberse a que aunque el ensayo 1 volvió a repetirse volteando las probetas al revés, la deformación que había tenido la primera vez que se realizó en el ensayo repercutió considerablemente en su comportamiento.

Debido a los problemas que se presentaron en el ensayo 1, cuando se realice el análisis de resultados se descartará dicho ensayo.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

ENSAYO 3

Para éste ensayo se utilizaron las probetas 14, 15 y 21, de 4” correspondientes a un 7% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

ENSAYO 4

Éste ensayo es una réplica del ensayo 3, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizaron las probetas 13, 18 y 23, de 4” correspondientes a un 7% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

En la Tabla 5.5.3 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 3 y 4, en la Figura 5.5.5 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.6 las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 3

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.2286
3	0.4699
5	0.635
10	0.8636
15	0.9906
20	1.0668
25	1.143
30	1.1938
35	1.2573
40	1.2954
45	1.3335
60	1.4478
75	1.5621
90	1.6383
105	1.6891
120	1.7653

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.5588**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.3048**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.3048**

ENSAYO 4

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.5588
3	0.7874
5	0.9017
10	1.0541
15	1.143
20	1.1684
25	1.2192
30	1.3081
35	1.3589
40	1.4224
45	1.4605
60	1.5621
75	1.6256
90	1.7145
105	1.778
120	1.8288

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.6096**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.3556**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.2032**

TABLA 5.5.3

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 3 Y 4, EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.5
ENSAYOS 3 Y 4 EN EL PROTOTIPO
“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

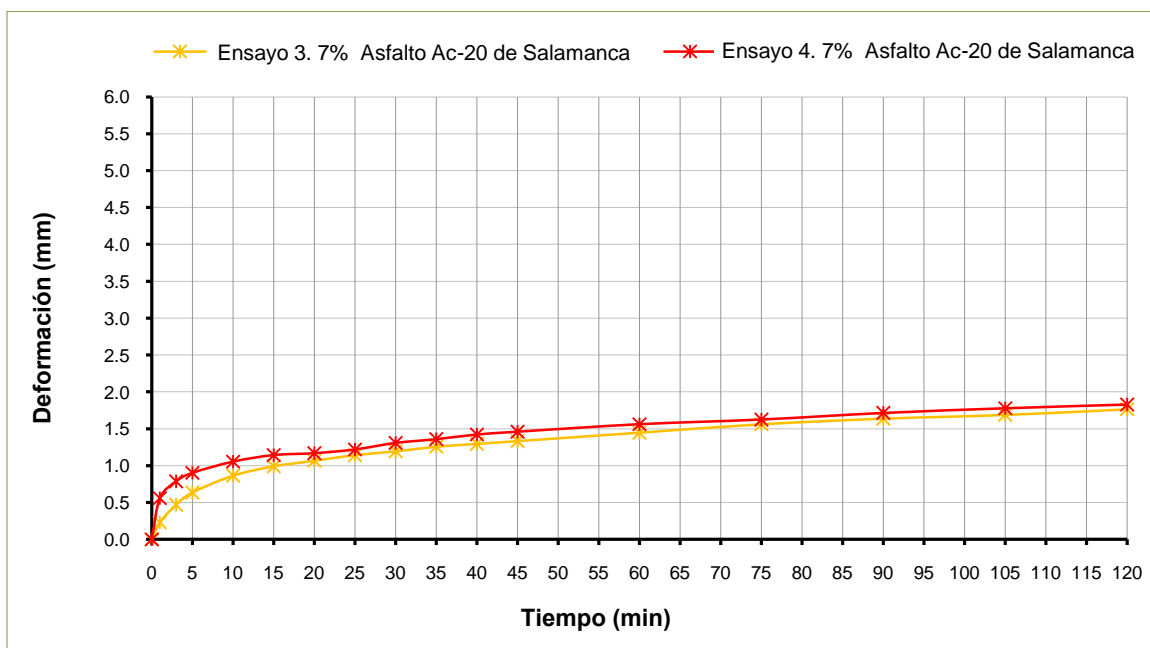


FIGURA 5.5.6
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 3 Y 4,
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

Como se puede observar las curvas de estos dos ensayos tienen un comportamiento similar.

ENSAYO 5

Para éste ensayo se utilizaron las probetas 25, 29 y 32, de 4” correspondientes a un 7% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

ENSAYO 6

Éste ensayo es una réplica del ensayo 5, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizaron las probetas 26, 34 y 35, de 4” correspondientes a un 7% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

En la Tabla 5.5.4 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 5 y 6, en la Figura 5.5.7 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.8 las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 5

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.7366
3	0.8128
5	0.8636
10	0.9525
15	1.0922
20	1.1938
25	1.27
30	1.3335
35	1.397
40	1.4478
45	1.4986
60	1.6002
75	1.6764
90	1.7526
105	1.8542
120	1.9304

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.6604**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.3048**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.3048**

ENSAYO 6

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.4699
3	0.6858
5	0.7874
10	0.9271
15	1.0414
20	1.1176
25	1.1811
30	1.2446
35	1.2827
40	1.3208
45	1.3462
60	1.4224
75	1.5113
90	1.5748
105	1.6383
120	1.6764

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.4064**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.254**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.1524**

TABLA 5.5.4

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 5 Y 6, EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.7
ENSAYOS 5 Y 6, EN EL PROTOTIPO
“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

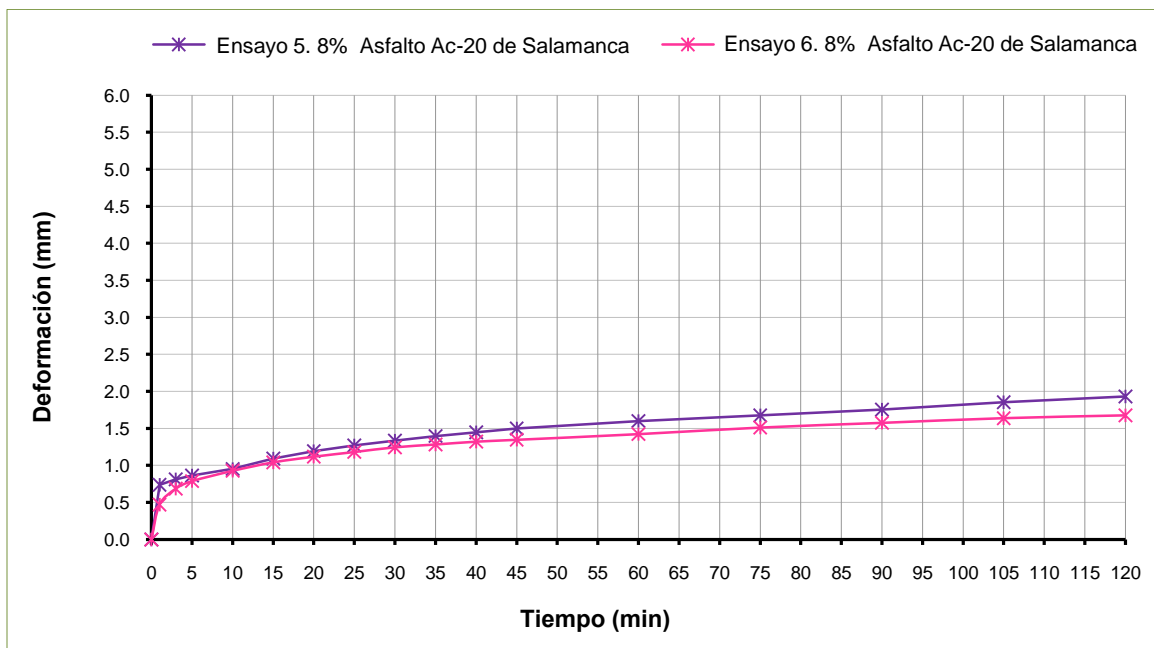


FIGURA 5.5.8
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 5 Y 6,
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

Como se puede observar las curvas de estos dos ensayos tienen un comportamiento similar.

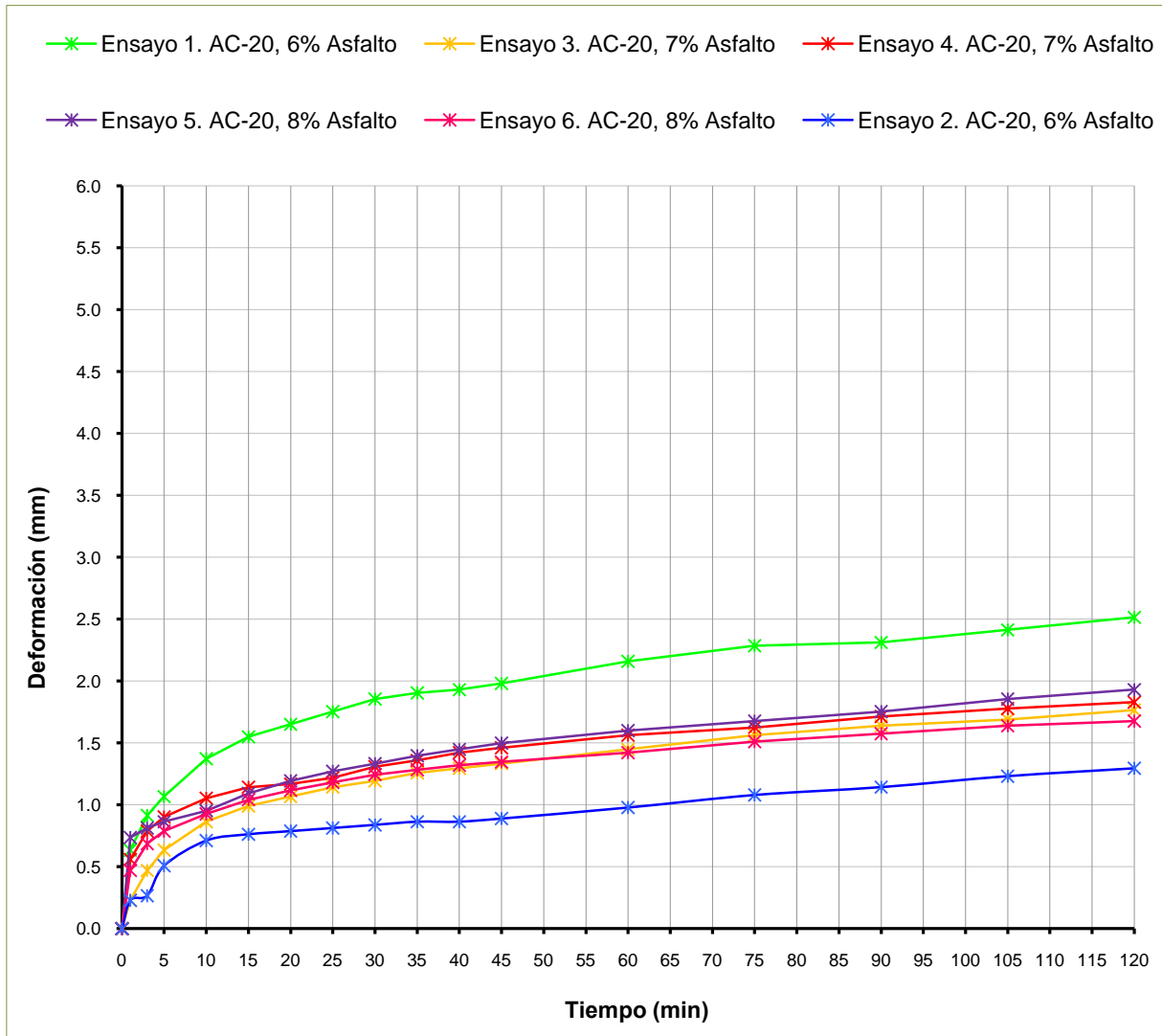


FIGURA 5.5.9
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”
PARA LOS ENSAYOS 1, 2, 3, 4, 5 Y 6 DE 4”. FABRICADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

Como al final de cada ensayo debe analizarse la velocidad de deformación en el intervalo de los minutos 105 –120. En la Figura 5.5.10 se podrá observar la velocidad de deformación de los ensayos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 elaboradas con AC – 20 de Salamanca.

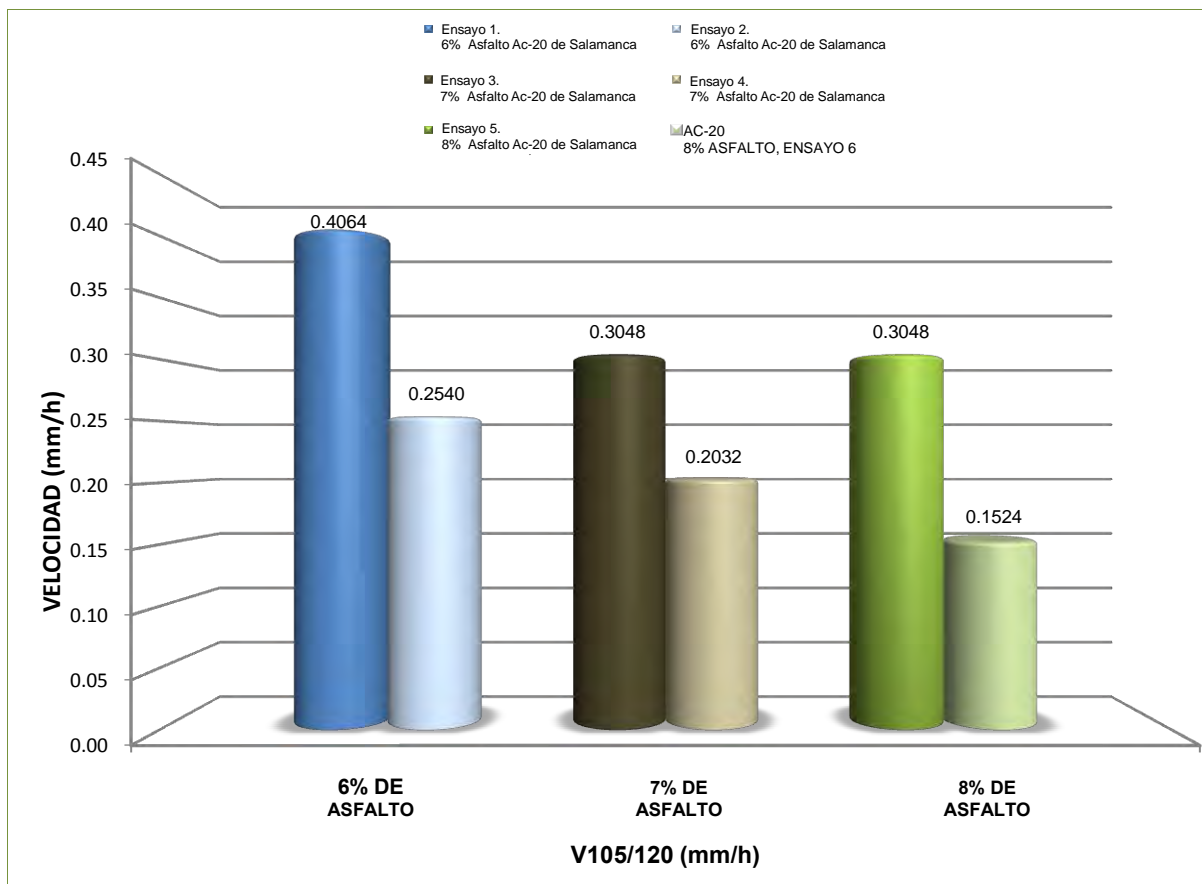


FIGURA 5.5.10
VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120,
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH, PARA LOS ENSAYOS
1, 2, 3, 4, 5 Y 6. DE LAS PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA

Para el análisis de resultados se descartará el Ensayo 1 y se realizará el promedio de las deformaciones para las probetas con el mismo contenido asfáltico.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ENSAYO 7

Para éste ensayo se utilizaron las probetas 2, 6 y 9, de 4”, correspondientes a un 6% de Asfalto modificado con Elvaloy.

ENSAYO 8

Éste ensayo es una réplica del ensayo 7, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizaron las probetas 7, 11 y 12, de 4”, correspondientes a un 6% de Asfalto modificado con Elvaloy.

En la Tabla 5.5.5 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 7 y 8, en la Figura 5.5.11 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.12 las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 7

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.10668
3	0.15748
5	0.18288
10	0.2667
15	0.3175
20	0.33528
25	0.4064
30	0.51308
35	0.5842
40	0.62992
45	0.66802
60	0.85852
75	0.93472
90	0.9652
105	1.0287
120	1.06172

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.61976**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.12192**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.13208**

ENSAYO 8

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.0381
3	0.0635
5	0.08128
10	0.1016
15	0.10668
20	0.12192
25	0.13462
30	0.1524
35	0.16764
40	0.18288
45	0.1905
60	0.23368
75	0.3048
90	0.35052
105	0.4064
120	0.4318

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.1524**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.18288**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.1016**

TABLA 5.5.5

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 7 Y 8 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.11
ENSAYOS 7 Y 8 EN EL PROTOTIPO
“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

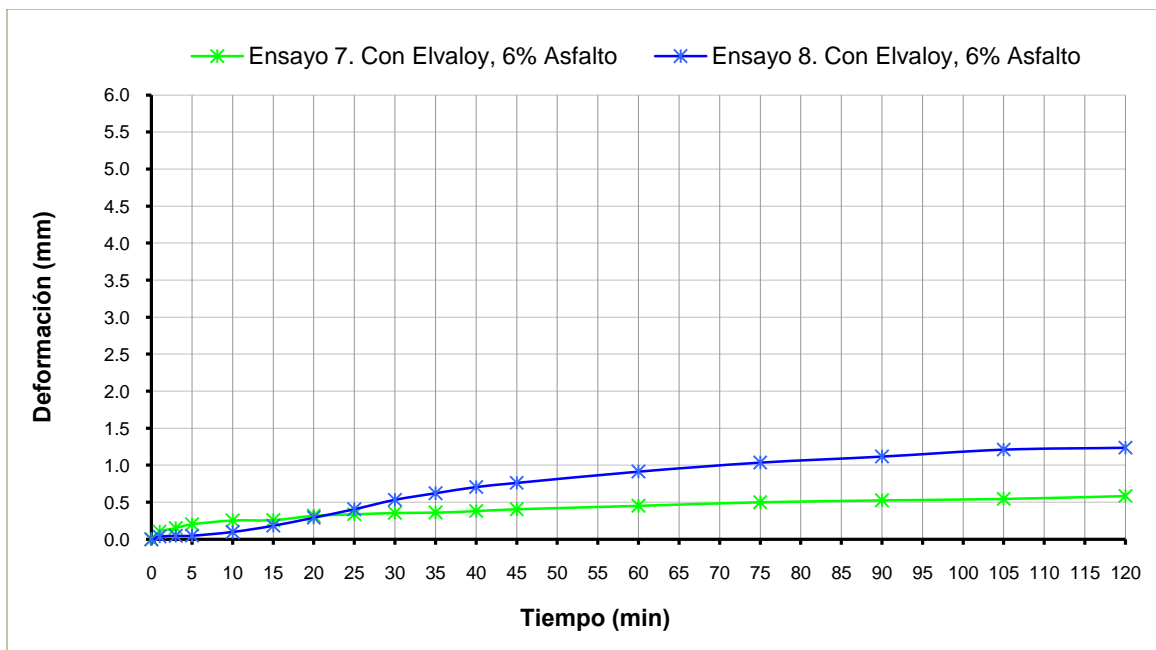


FIGURA 5.5.12
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 7 Y 8
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

ENSAYO 9

Para éste ensayo se utilizaron las probetas 14, 15 y 18, de 4” correspondientes a un 7% de Asfalto modificado con Elvaloy.

ENSAYO 10

Éste ensayo es una réplica del ensayo 9, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizaron las probetas 16, 21 y 23, de 4” correspondientes a un 7% de Asfalto modificado con Elvaloy.

En la Tabla 5.5.6 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 9 y 10, en la Figura 5.5.13 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.14 así como las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 9

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.06858
3	0.1397
5	0.2032
10	0.3556
15	0.4445
20	0.5207
25	0.56642
30	0.6096
35	0.65532
40	0.6858
45	0.70358
60	0.7493
75	0.80518
90	0.8509
105	0.889
120	0.9271

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.37592**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.18288**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.1524**

ENSAYO 10

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.08128
3	0.10668
5	0.11938
10	0.1524
15	0.16002
20	0.19812
25	0.2667
30	0.28448
35	0.33528
40	0.3683
45	0.38608
60	0.45466
75	0.50038
90	0.5588
105	0.5969
120	0.64262

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.4064**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.23368**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.18288**

TABLA 5.5.6

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 9 Y 10 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.13
ENSAYOS 9 Y 10 EN EL PROTOTIPO
“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

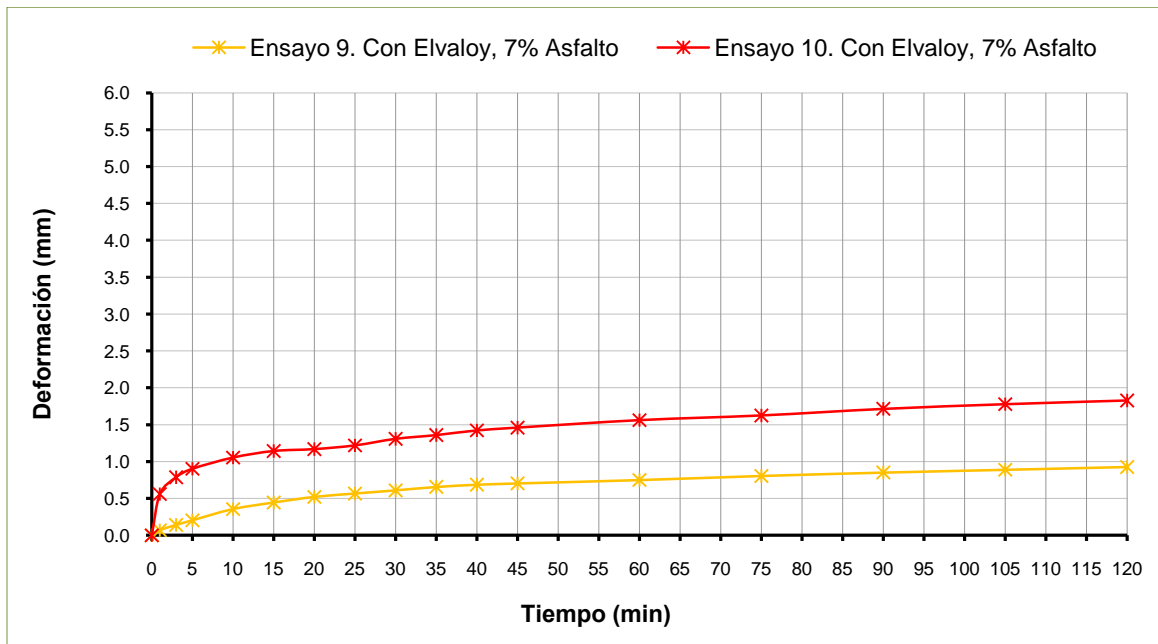


FIGURA 5.5.14
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 9 Y 10
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ENSAYO 11

Para éste ensayo se utilizaron las probetas 25, 34 y 36, de 4”, correspondientes a un 7% de Asfalto modificado.

ENSAYO 12

Éste ensayo es una réplica del ensayo 11, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizaron las probetas 28, 32 y 35, de 4”, correspondientes a un 7% de Asfalto modificado.

En la Tabla 5.5.7 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 9 y 10, en la Figura 5.5.15 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.16 las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 11

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.03048
3	0.04318
5	0.06858
10	0.16510
15	0.25400
20	0.34290
25	0.39370
30	0.57658
35	0.66040
40	0.69850
45	0.73152
60	0.81280
75	0.88392
90	0.96012
105	0.96520
120	0.99060

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.61976**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.30480**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.10160**

ENSAYO 12

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.88900
3	1.09220
5	1.19380
10	1.34620
15	1.49860
20	1.57480
25	1.65608
30	1.70180
35	1.77292
40	1.84150
45	2.20980
60	3.07340
75	3.17500
90	3.22580
105	3.25374
120	3.28930

$V_{30/45}$ (mm/h): **2.03200**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.20320**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.14224**

TABLA 5.5.7

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 11 Y 12 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio



FIGURA 5.5.15
ENSAYOS 11 Y 12 EN EL PROTOTIPO
“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

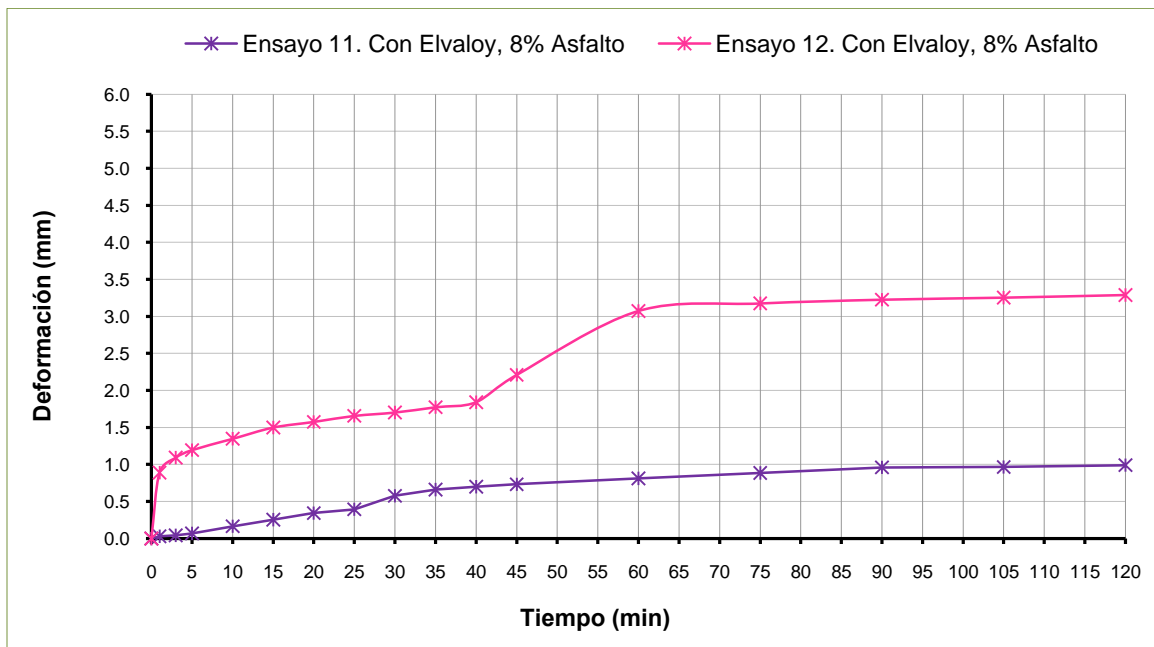


FIGURA 5.5.16
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 11 Y 12
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

En el ensayo 12 una de las probetas quedó más abajo, además de que se detectó que la punta del indicador de carátula estaba floja, al analizar la velocidad de deformación en el intervalo de tiempo de los minutos 105 –120 se determinará si se descartará este ensayo.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

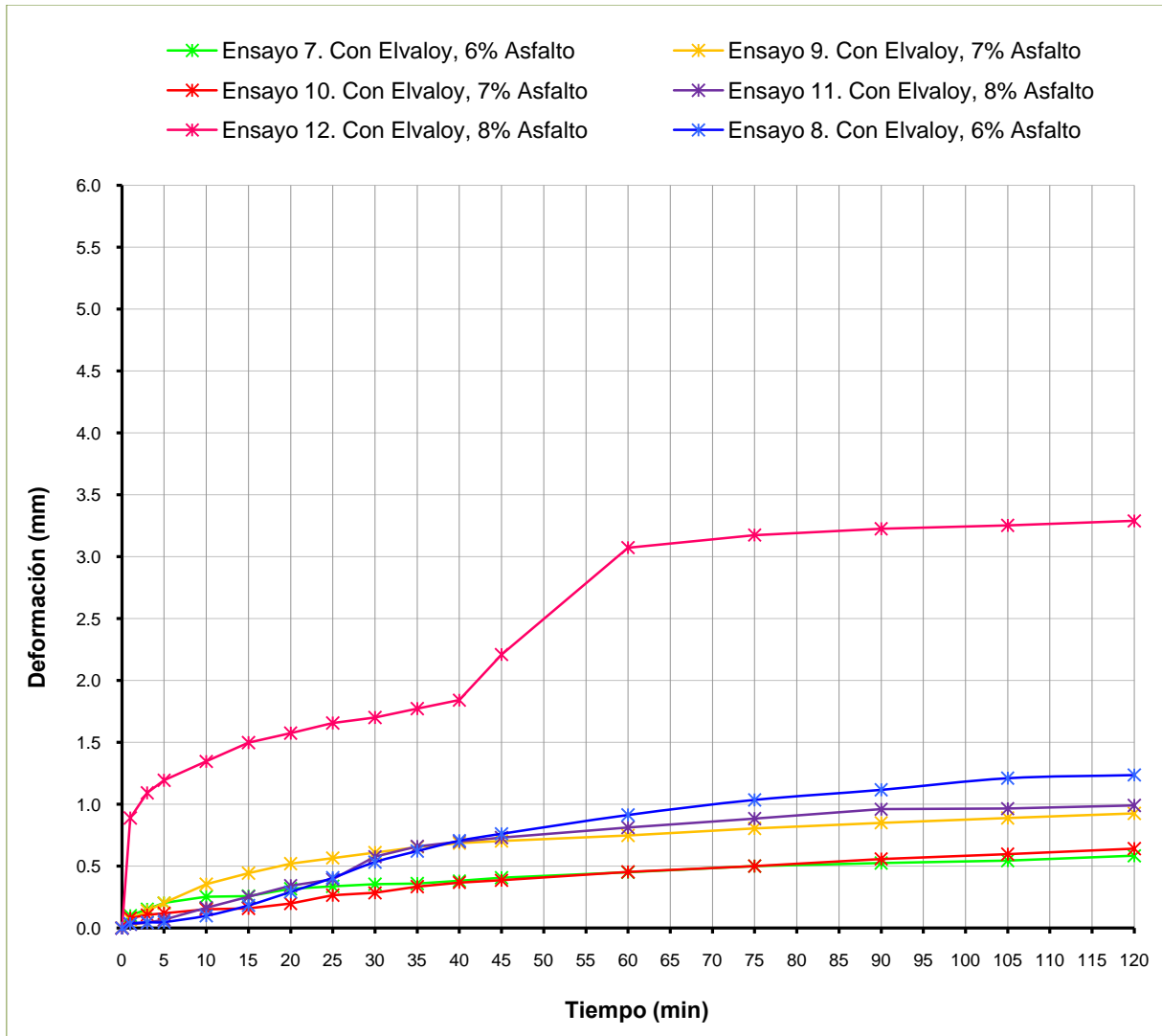


FIGURA 5.5.17

GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”
PARA LOS ENSAYOS 7, 8, 9, 10, 11 Y 12 DE 4”. FABRICADAS CON ASFALTO MODIFICADO



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

Como al final de cada ensayo debe analizarse la velocidad de deformación en el intervalo de los minutos 105 –120. En la Figura 5.5.18 se podrá observar la velocidad de deformación de los ensayos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 elaboradas con Asfalto modificado.

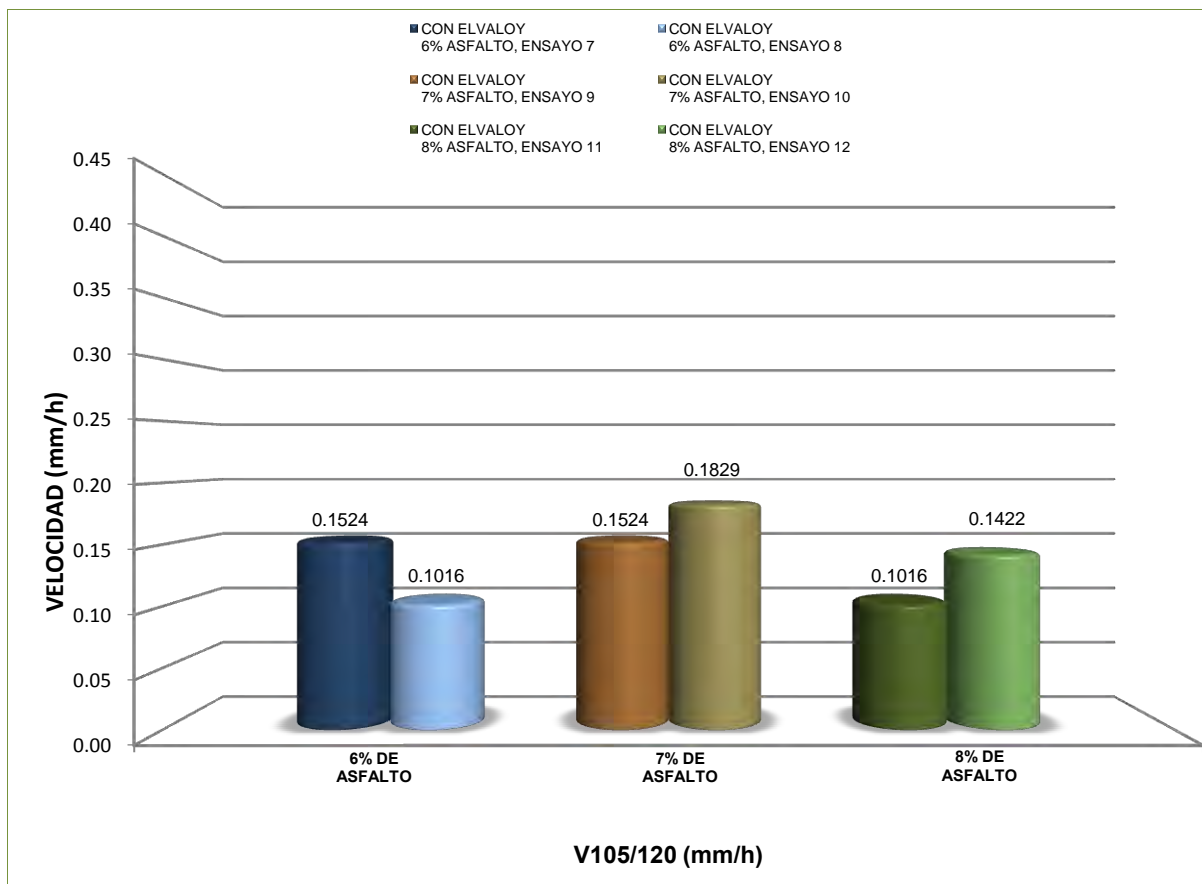


FIGURA 5.5.18

VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”, PARA LOS ENSAYOS
7, 8, 9, 10, 11 Y 12. DE LAS PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO MODIFICADO

En la Figura 5.5.18 se puede observar que las velocidades de deformación en todos los casos es muy similar, sin embargo debido a los problemas presentados en el ensayo 12 y a la curva deformación tiempo, se decidió descartar dicho ensayo. Para los otros ensayos, en el análisis de resultados se realizará el promedio de las deformaciones para las probetas con el mismo contenido asfáltico.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

ENSAYO 13

Para éste ensayo se utilizó la probeta 1, de 6” correspondientes a un 6% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

ENSAYO 14

Éste ensayo es una réplica del ensayo 13, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizó la probeta 4, de 6”, correspondientes a un 6% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

En la Tabla 5.5.8 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 9 y 10, en la Figura 5.5.19 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.20 las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 13

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.20320
3	0.39370
5	0.52070
10	0.66040
15	0.73152
20	0.80772
25	0.85090
30	0.90932
35	0.93472
40	0.99822
45	1.01092
60	1.11252
75	1.20650
90	1.25730
105	1.31572
120	1.36144

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.40640**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.20320**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.18288**

ENSAYO 14

TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0
1	0.00508
3	0.07620
5	0.16510
10	0.43688
15	0.57150
20	0.68580
25	0.77978
30	0.83820
35	0.90678
40	0.96266
45	1.01600
60	1.13030
75	1.19380
90	1.28778
105	1.34620
120	1.39700

$V_{30/45}$ (mm/h): **0.71120**
 $V_{75/90}$ (mm/h): **0.37592**
 $V_{105/120}$ (mm/h): **0.20320**

TABLA 5.5.8

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 13 Y 14 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.19
ENSAYOS 13 Y 14 EN EL PROTOTIPO
“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

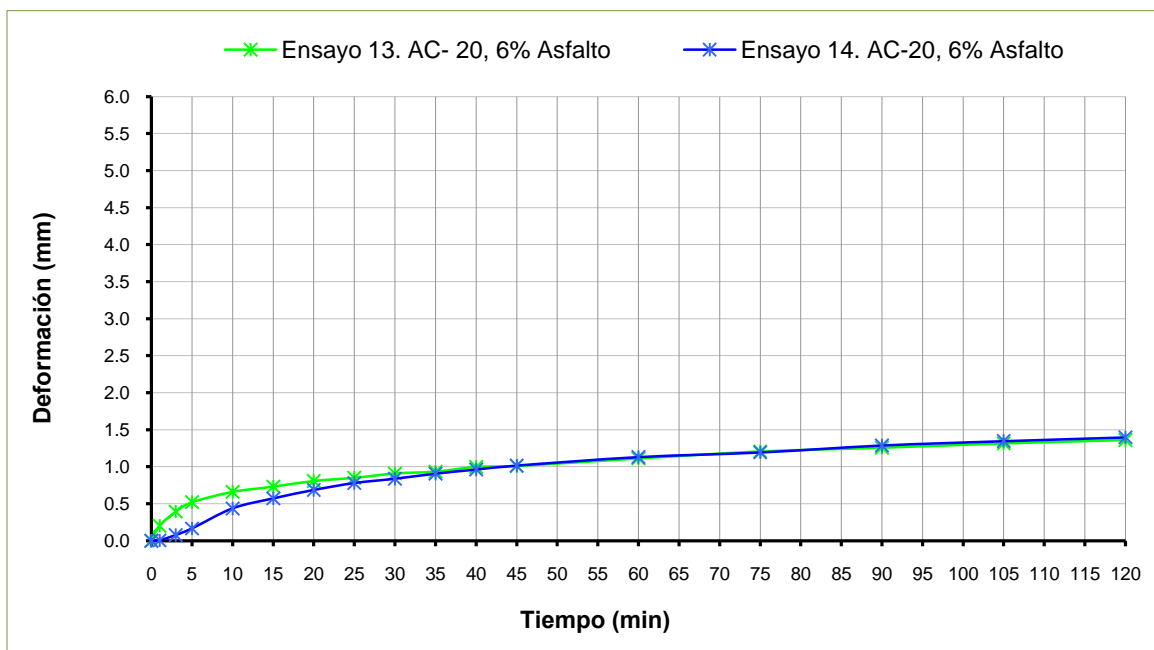


FIGURA 5.5.20
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 13 Y 14
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

En el ensayo 13 una de las probetas quedó más abajo, ocasionando que se presentara un brinco. Sin embargo posteriormente ambas curvas tienen un comportamiento similar.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

ENSAYO 15

Para éste ensayo se utilizó la probeta 5, de 6", correspondientes a un 7% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

ENSAYO 16

Éste ensayo es una réplica del ensayo 15, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizó la probeta 7, de 6", correspondientes a un 7% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

En la Tabla 5.5.9 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 15 y 16, en la Figura 5.5.21 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.22 las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 15				ENSAYO 16			
TIEMPO	DEFORMACIÓN			TIEMPO	DEFORMACIÓN		
0	0			0	0		
1	0.00508			1	0.00508		
3	0.05080			3	0.02032		
5	0.19050			5	0.02540		
10	0.44450			10	0.02540		
15	0.60960			15	0.02540		
20	0.73406			20	0.10668		
25	0.81280			25	0.19558		
30	0.91440			30	0.25146		
35	0.98298			35	0.28702		
40	1.04140	$V_{30/45}$ (mm/h):	0.71120	40	0.31242	$V_{30/45}$ (mm/h):	0.38608
45	1.09220	$V_{75/90}$ (mm/h):	0.38608	45	0.34798	$V_{75/90}$ (mm/h):	0.24384
60	1.24460	$V_{105/120}$ (mm/h):	0.38608	60	0.43180	$V_{105/120}$ (mm/h):	0.10160
75	1.37668			75	0.49022		
90	1.47320			90	0.55118		
105	1.60020			105	0.58420		
120	1.69672			120	0.60960		

TABLA 5.5.9

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 15 Y 16 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.21
ENSAYOS 15 Y 16 EN EL PROTOTIPO
“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

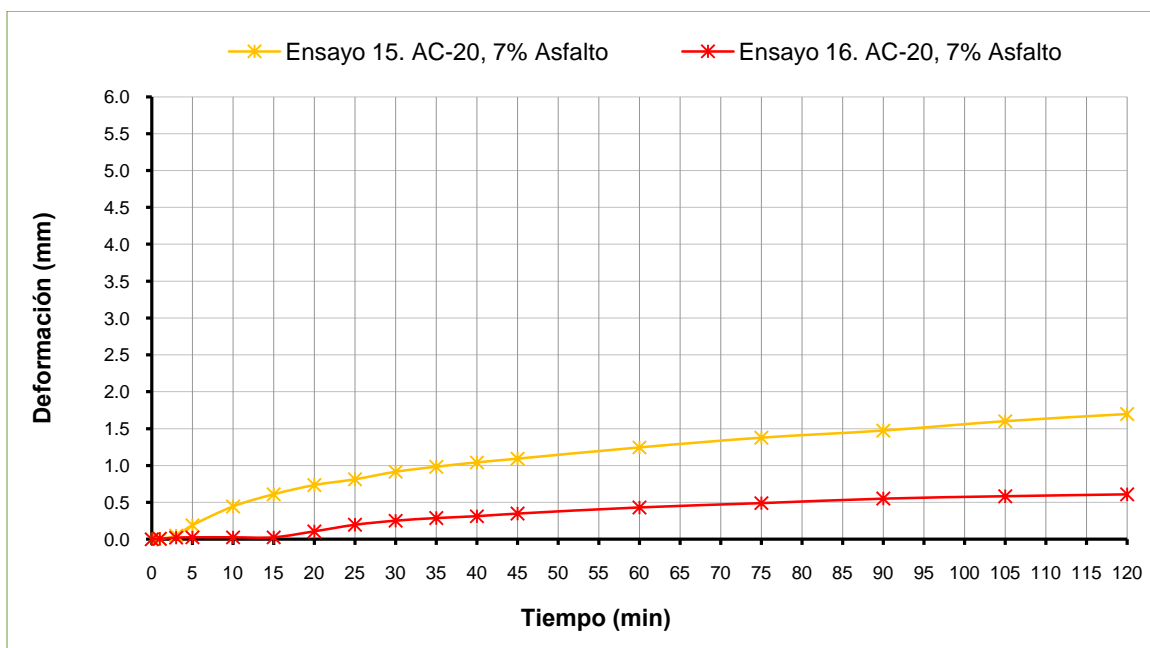


FIGURA 5.4.22
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 15 Y 16
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

En el ensayo 16 una de las probetas quedó más abajo, se movieron los detectores de posición y tuvieron que reajustarse, por lo cual se detuvo la prueba, posteriormente a los 5 min. se reinició y se puso el indicador de carátula en cero.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ENSAYO 17

Para éste ensayo se utilizó la probeta 9, de 6", correspondientes a un 7% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

ENSAYO 18

Éste ensayo es una réplica del ensayo 17, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizó la probeta 11, de 6", correspondiente a un 7% de Asfalto AC-20 de Salamanca.

En la Tabla 5.5.10 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 17 y 18, en la Figura 5.5.23 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.24 las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 17				ENSAYO 18	
TIEMPO	DEFORMACIÓN			TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0			0	0
1	0			1	0.45720
3	0			3	1.19380
5	0			5	1.65100
10	0.00508			10	1.82880
15	0.10414			15	2.34950
20	0.14986			20	2.81178
25	0.19304			25	3.09880
30	0.27432			30	3.39090
35	0.34290			35	3.67030
40	0.41910	V_{30/45}(mm/h): 0.90424		40	3.89890
45	0.50038	V_{75/90}(mm/h): 0.28448		45	4.14782
60	0.66040	V_{105/120}(mm/h): 0.02032		60	4.82600
75	0.81788			75	5.06730
90	0.88900			90	5.14350
105	0.89154			105	5.23748
120	0.89662			120	5.51180

TABLA 5.5.10

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 17 Y 18 EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.23
ENSAYOS 17 Y 18 EN EL PROTOTIPO
“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

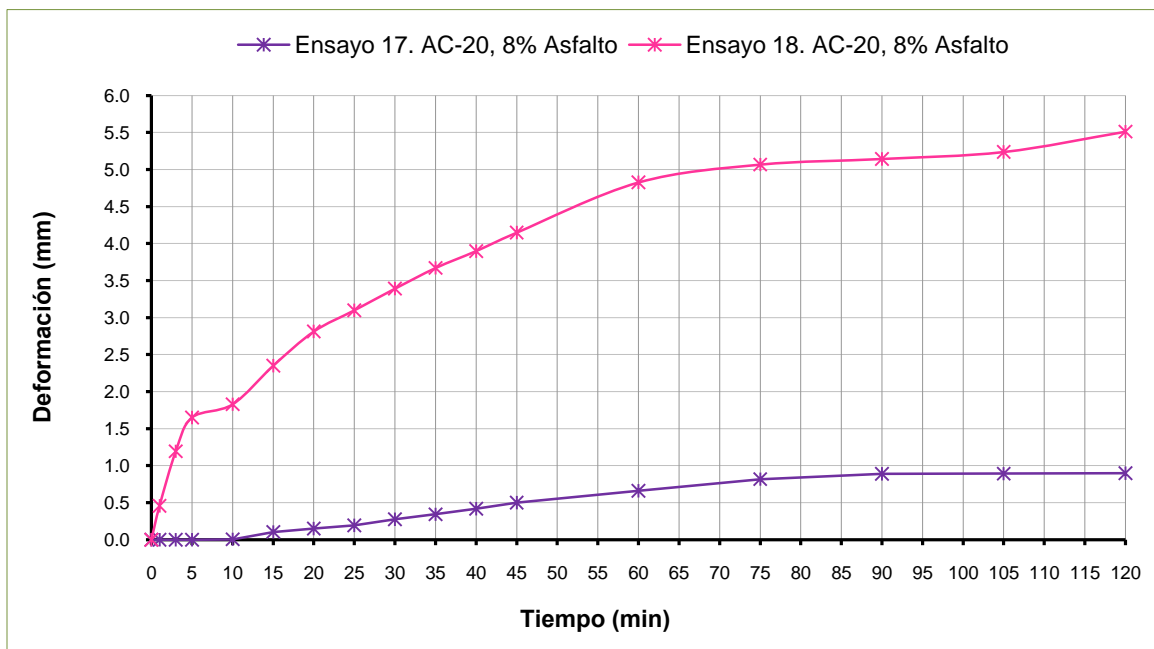


FIGURA 5.5.24
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 17 Y 18
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

En el ensayo 18 una de las probetas quedó más abajo, además de que la rueda rosaba con el molde metálico, lo que se ocasionó que se tomaran deformaciones erróneas, por lo tanto en el análisis se resultados se descartará este ensayo.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

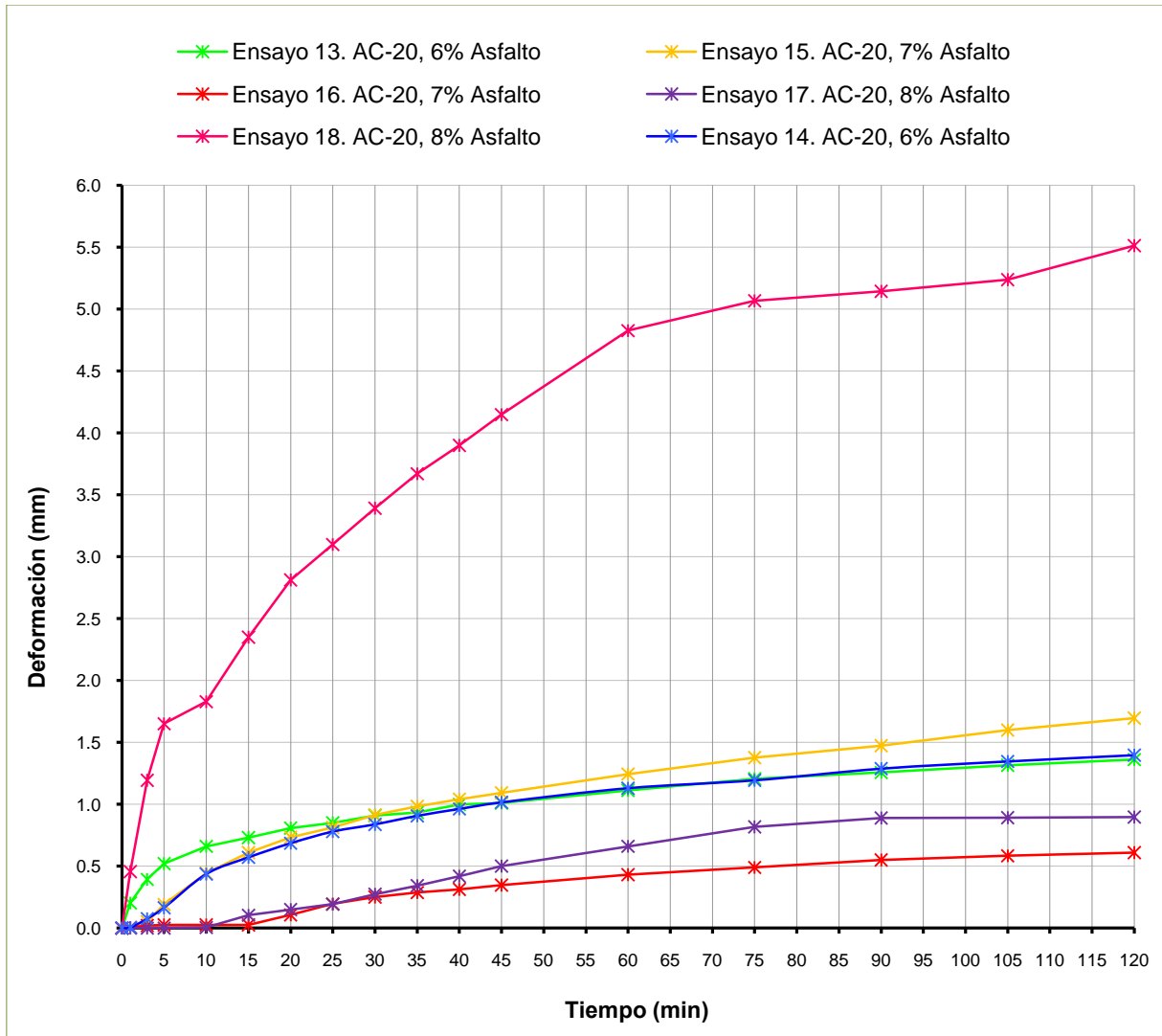


FIGURA 5.5.25

GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”,
PARA LOS ENSAYOS 13, 14, 15, 16, 17 Y 18 DE 6”. FABRICADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

Como al final de cada ensayo debe analizarse la velocidad de deformación en el intervalo de los minutos 105 –120. En la Figura 5.5.10 se podrá observar la velocidad de deformación de los ensayos 13, 14, 15, 16, 17 y 18 elaboradas con AC – 20 de Salamanca.

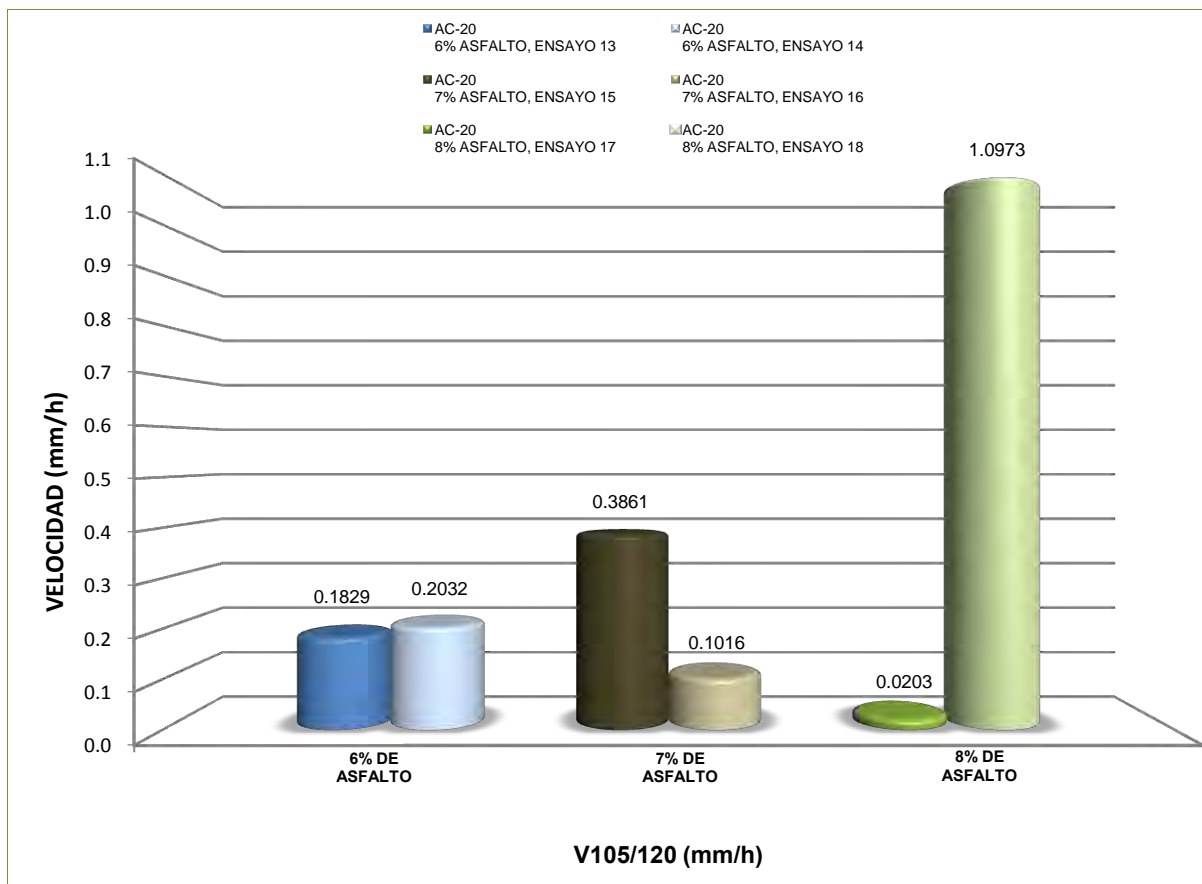


FIGURA 5.5.26

VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120.
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”, PARA LOS ENSAYOS
13, 14, 15, 16, 17 Y 18. DE LAS PROBETAS ELABORADAS CON AC-20 DE SALAMANCA

Se decidió descartar el ensayo 18 para el análisis de resultado, debido a que una de las probetas quedó más abajo, además de que la rueda rosaba con el molde metálico, lo que se ocasionó que se tomarán deformaciones erróneas.

Además se realizará el promedio de las deformaciones para las probetas con el mismo contenido asfáltico.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ENSAYO 19

Para éste ensayo se utilizó las probetas 4, de 6”, correspondientes a un 6% de Asfalto modificado.

ENSAYO 20

Éste ensayo es una réplica del ensayo 19, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizó la probeta 3, de 6”, correspondientes a un 6% de Asfalto modificado.

En la Tabla 5.5.11 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 19 y 20, en la Figura 5.5.27 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.28 las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 19		ENSAYO 20	
TIEMPO	DEFORMACIÓN	TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0	0	0
1	0.10668	1	0.0381
3	0.15748	3	0.0635
5	0.18288	5	0.08128
10	0.26670	10	0.1016
15	0.31750	15	0.10668
20	0.33528	20	0.12192
25	0.40640	25	0.13462
30	0.51308	30	0.1524
35	0.58420	35	0.16764
40	0.62992	40	0.18288
45	0.66802	45	0.1905
60	0.85852	60	0.23368
75	0.93472	75	0.3048
90	0.96520	90	0.35052
105	1.02870	105	0.4064
120	1.06172	120	0.4318

<p>V_{30/45}(mm/h): 0.61976</p> <p>V_{75/90}(mm/h): 0.12192</p> <p>V_{105/120}(mm/h): 0.13208</p>	<p>V_{30/45}(mm/h): 0.1524</p> <p>V_{75/90}(mm/h): 0.18288</p> <p>V_{105/120}(mm/h): 0.1016</p>
--	--

TABLA 5.5.11

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 19 Y 20 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.27
ENSAYOS 19 Y 20 EN EL PROTOTIPO
"PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"

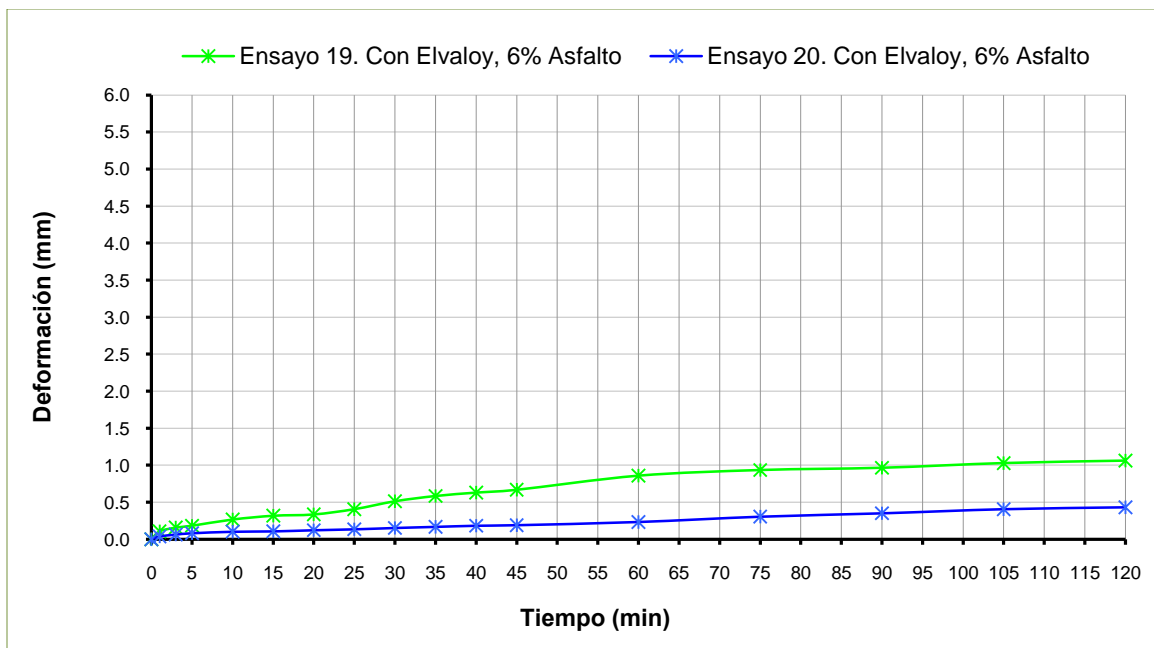


FIGURA 5.5.28
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 19 Y 20
EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ENSAYO 21

Para éste ensayo se utilizó la probeta 8, de 6”, correspondientes a un 7% de Asfalto modificado.

ENSAYO 22

Éste ensayo es una réplica del ensayo 21, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizó la probeta 7, de 6”, correspondientes a un 7% de Asfalto modificado.

En la Tabla 5.5.12 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 21 y 22, en la Figura 5.5.29 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.30 las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 21				ENSAYO 22	
TIEMPO	DEFORMACIÓN			TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0			0	0
1	0.78740			1	0.12700
3	0.88900			3	0.30480
5	0.91440			5	0.47752
10	1.02108			10	0.70358
15	1.29540			15	0.82550
20	1.42240			20	0.90678
25	1.47828			25	0.95250
30	1.62560			30	1.01600
35	1.72212			35	1.07188
40	1.77800	V_{30/45}(mm/h): 0.81280		40	1.17602
45	1.82880	V_{75/90}(mm/h): 0.00000		45	1.31318
60	2.03708	V_{105/120}(mm/h): 0.00000		60	1.52400
75	2.10820			75	1.79070
90	2.10820			90	2.23520
105	2.10820			105	2.65430
120	2.10820			120	2.69240

TABLA 5.5.12

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 21 Y 22 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.29
ENSAYOS 21 Y 22 EN EL PROTOTIPO
“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

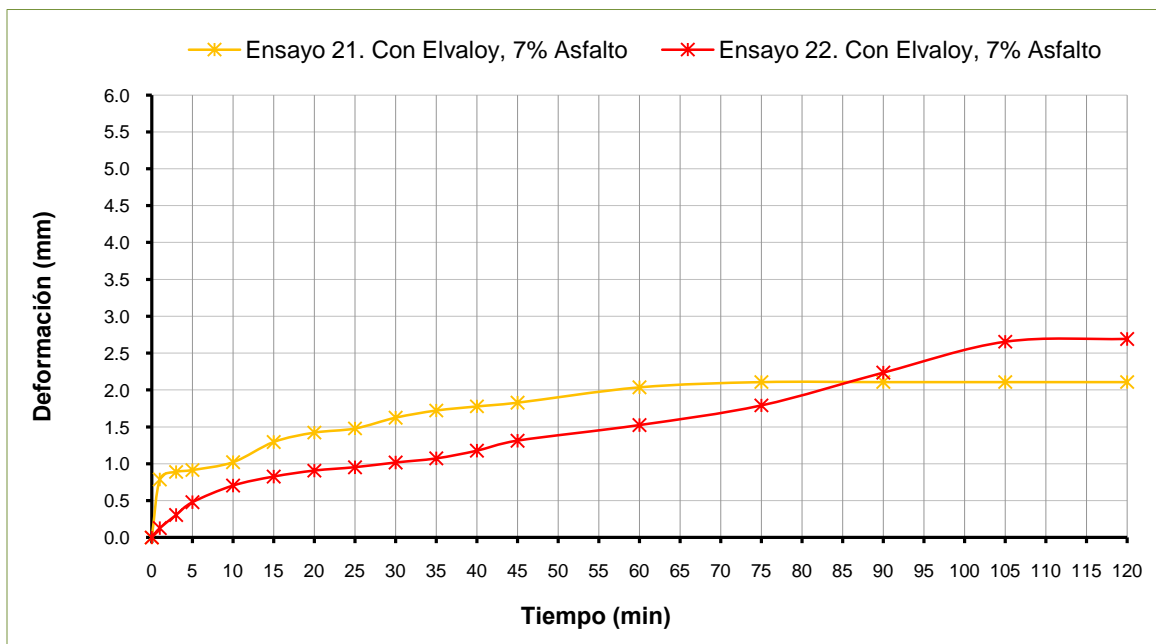


FIGURA 5.4.30
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 21 Y 22
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

Al final del ensayo 21 se observó que la punta del indicador de carátula estaba floja, lo que se ve reflejado en la gráfica de ésta prueba, por lo tanto se descartará éste ensayo para el análisis de resultados.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ENSAYO 23

Para éste ensayo se utilizó las probetas 9, de 6”, correspondientes a un 7% de Asfalto modificado.

ENSAYO 24

Éste ensayo es una réplica del ensayo 23, se realizó con el fin de corroborar los datos obtenidos en cada ensayo; para él se utilizaron las probetas 11, de 6”, correspondientes a un 7% de Asfalto modificado.

En la Tabla 5.5.13 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos 23 y 24, en la Figura 5.5.31 se puede observar la deformación que tuvieron las probetas y en la Figura 5.5.32 las gráficas de tiempo – deformación.

ENSAYO 23		ENSAYO 24	
TIEMPO	DEFORMACIÓN	TIEMPO	DEFORMACIÓN
0	0	0	0.00000
1	0.00508	1	0.05080
3	0.03810	3	0.11430
5	0.04572	5	0.12700
10	0.04826	10	0.13208
15	0.05080	15	0.20066
20	0.05080	20	0.25400
25	0.05080	25	0.28448
30	0.05080	30	0.29972
35	0.05080	35	0.33528
40	0.05080	40	0.37084
45	0.05080	45	0.40640
60	0.05080	60	0.50292
75	0.05080	75	0.54610
90	0.05334	90	0.62992
105	0.05588	105	0.78740
120	0.06350	120	0.86360

<p>$V_{30/45}$(mm/h): 0.00000</p> <p>$V_{75/90}$(mm/h): 0.01016</p> <p>$V_{105/120}$(mm/h): 0.03048</p>	<p>$V_{30/45}$(mm/h): 0.42672</p> <p>$V_{75/90}$(mm/h): 0.33528</p> <p>$V_{105/120}$(mm/h): 0.30480</p>
---	---

TABLA 5.5.13

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ENSAYO 23 Y 24 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.31
ENSAYOS 23 Y 24 EN EL PROTOTIPO
“PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

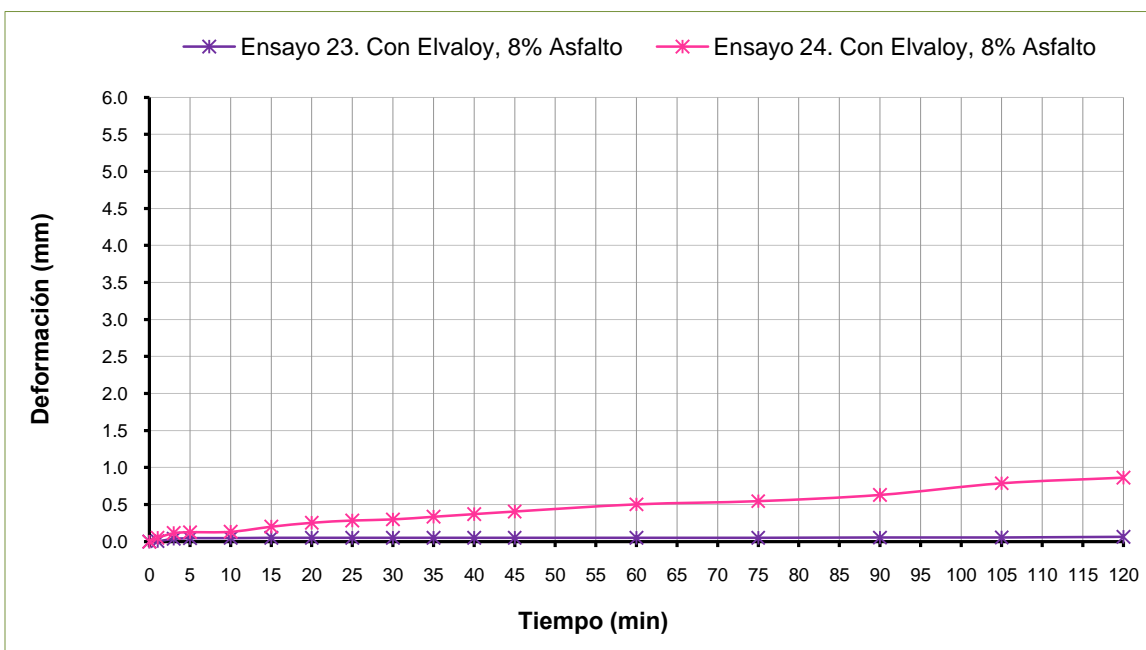


FIGURA 5.5.32
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS 23 Y 24
EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

En el ensayo 24 una de las probetas quedó más abajo, lo que ocasionó que las lecturas tomadas fueran erróneas, por consiguiente en el análisis de resultados del Capítulo 6 se descartará este ensayo.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

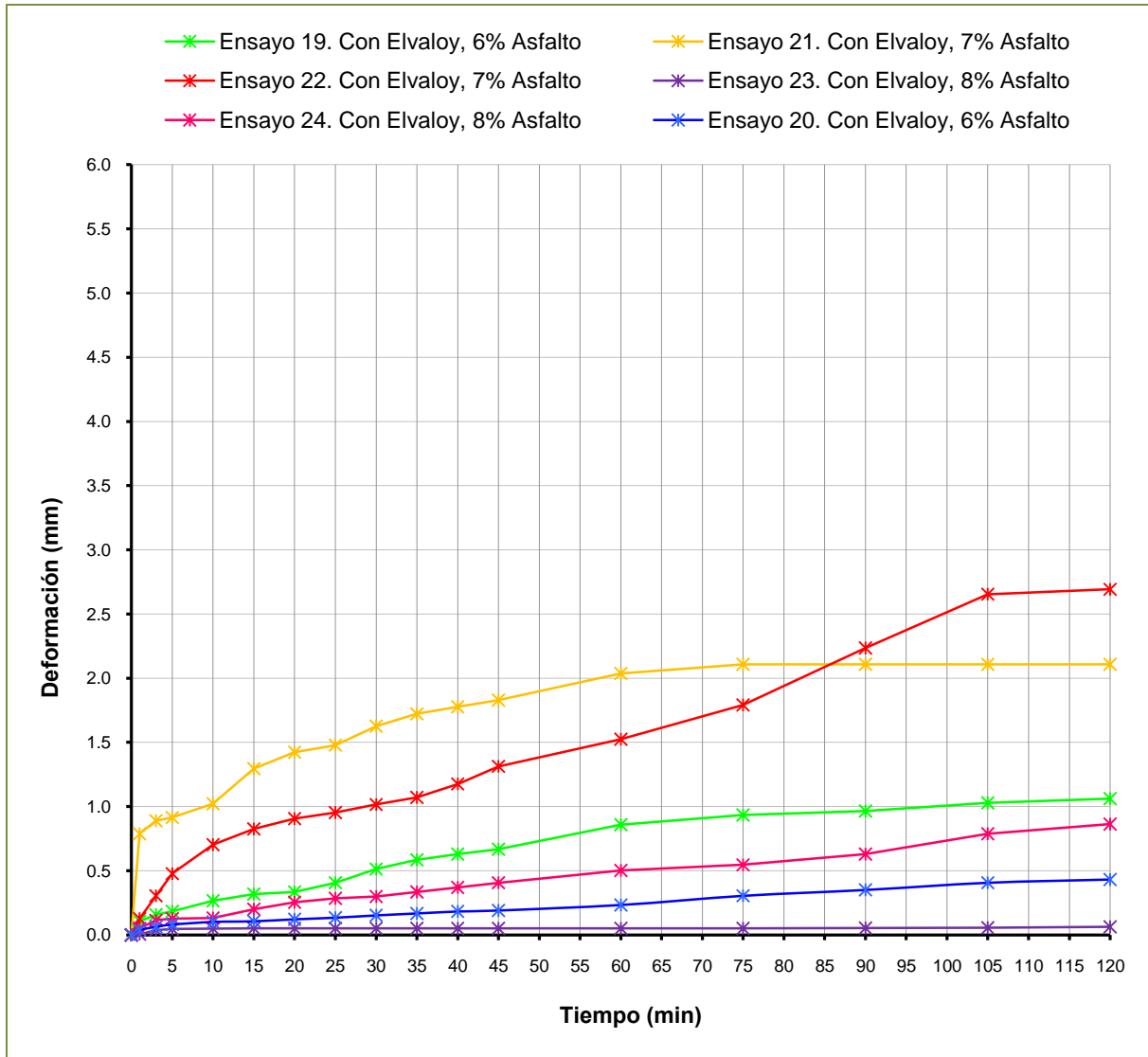


FIGURA 5.5.33

GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”
PARA LOS ENSAYOS 19, 20, 21, 22, 23 y 24. DE LAAS PROBETAS FABRICADAS CON ASFALTO MODIFICADO



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

Como al final de cada ensayo debe analizarse la velocidad de deformación en el intervalo de los minutos 105 –120. En la Figura 5.5.18 se podrá observar la velocidad de deformación de los ensayos 19, 20, 21, 22, 23 y 24 elaboradas con Asfalto modificado.

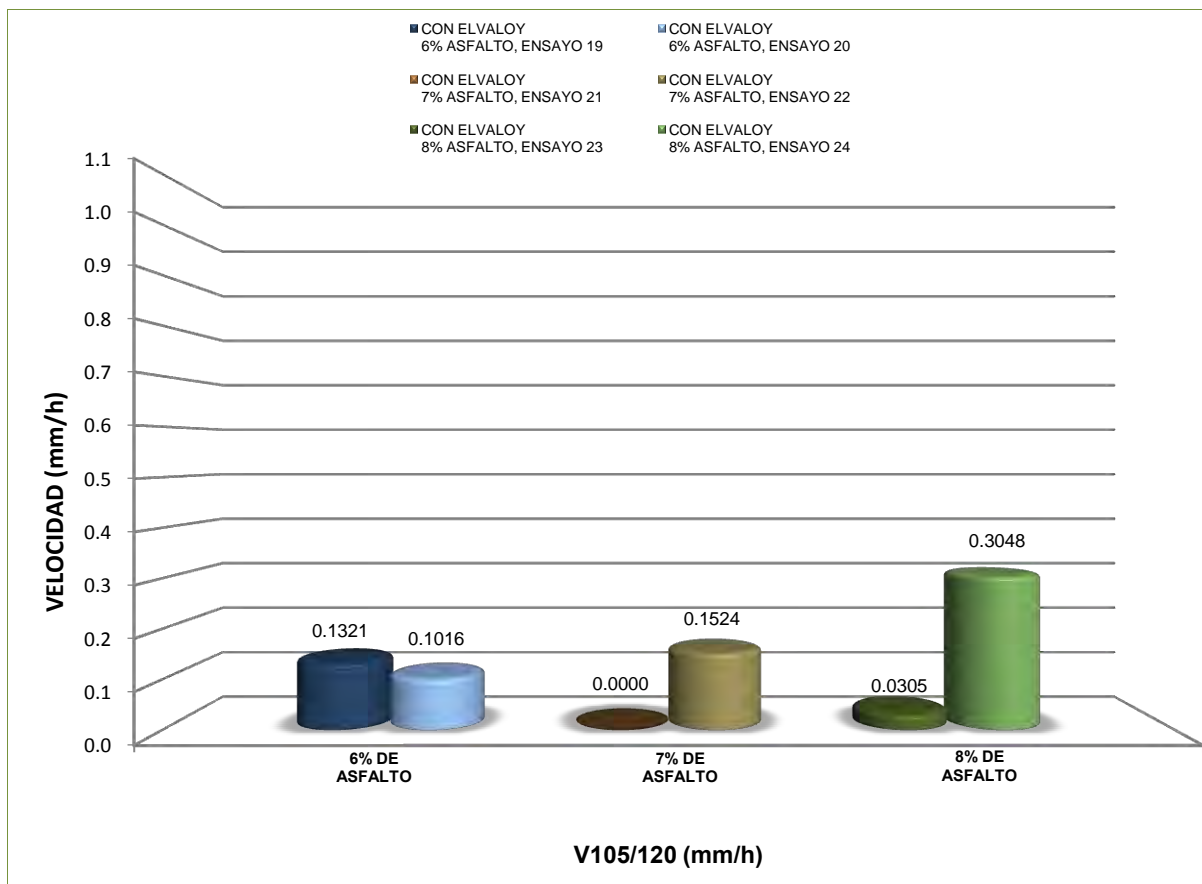


FIGURA 5.5.34

VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN EN EL INTERVALO DE LOS MINUTOS 105 – 120 EN EL PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”, PARA LOS ENSAYOS 19, 20, 21, 22, 23 Y 24. DE LAS PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO MODIFICADO

Para el análisis de resultados se descartarán los ensayos 21 y 24, para los otros ensayos se realizará el promedio de las deformaciones para las probetas con el mismo contenido asfáltico.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de éste trabajo fue la creación de un Prototipo a bajo costo que permita evaluar la susceptibilidad de las mezclas asfálticas ante las deformaciones permanentes.

Es normal que al ser un equipo nuevo se presenten algunas inconsistencias en la realización de los primeros ensayos, debido a las irregularidades presentadas se decidió descartar algunos de los ensayos.

Cabe mencionar que actualmente el equipo funciona adecuadamente y que deben cuidarse los parámetros que dependen más de la preparación de las muestras que del propio ensayo, como son:

- El corte adecuado de las probetas a la altura de 50 mm.
- La colocación de arena sílica entre cada probeta, para que no exista un desplazamiento de la mezcla asfáltica hacia las orillas.



5.5.3 ENSAYOS REALIZADOS EN EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA”

Para la realización de los ensayos de 4” se utilizó 1 probeta por cada variable, considerando que se contaba con 3 porcentajes de asfalto, 2 tipos de asfalto, que se realizaron 2 ensayos por variable, y se realizaron ensayos en seco y en saturado en total se utilizaron 24 probetas de 4”. Para los ensayos de 6” también se necesitó 1 probeta por variable, utilizando las mismas variables de las probetas de 4”, considerando que solamente se realizaron ensayos en seco, se utilizaron únicamente 12 probetas, es necesario recordar que de cada una de las probetas se fabricaron inicialmente de éste diámetro salieron 2 probetas, una mitad de cada una de ellas se utilizó en el APA y la otra en la Rueda Cargada de Hamburgo.

CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

A continuación se mencionan algunas características de Método estándar de la prueba denominada AASHTO TP 63-07 “Determinación de la susceptibilidad a las roderas de las mezclas Asfálticas (HMA) usando el Analizador de Pavimentos Asfálticos”, la cual fue aceptada en Noviembre de 2002, Publicada en Julio de 2003 y revisada en el 2007.

- El método consiste en aplicar cargas lineales repetidas a través de mangueras presurizadas a las probetas.
- El APA tiene un control termostático que controla la temperatura constante entre los 4 y 72 °C con un rango de $\pm 1^\circ\text{C}$.
- El APA es capaz de aplicar cargas independientes en cada rueda de 578 N (130 lbf). La calibración de la carga de la prueba se realiza mediante un transductor externo de fuerza. Es capaz de ajustar la presión en las mangueras y mantenerla a 862 Kpa (125 psi). Las mangueras sobre las cuales circula la rueda de acero son de nylon, con un ancho interior de 19 mm y un diámetro exterior de 29.5 mm. Su funcionamiento máximo de presión es de 5.17 MPa (750 Psi) y deben ser remplazadas cuando tengan un desgaste considerable.
- Se debe calibrar la presión de las mangueras a 690 ± 35 KPa (100 ± 5 psi) y la carga de cada una de las ruedas hasta leer 445 ± 22 N (100 ± 5 lbf).



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

- Es posible realizar pruebas en 6 probetas cilíndricas. Los moldes para las pruebas son rectangulares, de polietileno. Cada molde tienen 2 agujeros de 150 ± 2 mm de diámetro por 75 ± 2 mm de alto.
- El APA cuenta con un contador principal programable de ciclos, con el cual se puede prefijar el número de ciclos deseados para la prueba, el equipo se detiene automáticamente al concluir dichos ciclos.
- Las probetas se precalientan en un horno a la temperatura de la prueba mínimo 6 hrs.
- Se debe comprobar que la temperatura a la que se realizará el ensayo sea estable.
- Se deben sacar las probetas del horno, y colocarlos en las bandejas, introducir las bandejas con las probetas a la cámara y sujetar las bandejas; la cámara no debe permanecer abierta por más de 6 minutos. Se debe permitir que se estabilice la temperatura de la cámara, aproximadamente durante 10 minutos, para posteriormente iniciar la prueba.
- Se deben aplicar 25 ciclos para permitir el asentamiento de las probetas, durante el transcurso de ellos se debe ajustar la presión de las mangueras.
- Al término de los 8,000 ciclos el APA se detiene automáticamente y las ruedas de carga se retiran automáticamente.
- El APA cuenta con un programa de computación, en el cual al término de los 8,000 ciclos proporciona la profundidad de la deformación permanente que sufrió la probeta.
- El informe de la prueba debe incluir: Nombre del laboratorio, nombre del Técnico y la fecha de la prueba. Tipo de Mezcla y su descripción. El tipo de probetas de la prueba (cilindros o corazones). Para los cilindros el tipo de dispositivo de consolidación (SGC o el compactador vibratorio). El promedio del contenido de vacíos de las probetas. La temperatura de la prueba. El método utilizado para medir la profundidad de la rodada (manual o automático). La medida de la profundidad de la rodada para cada una de las 3 posiciones de la prueba.
- La calibración completa del equipo debe realizarse por lo menos 1 vez al año, de acuerdo a la especificación de la norma.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

- Como la realización de los ensayos en el APA involucran varios parámetros (presión de la carga, contenido de vacíos, altura de las probetas, etc.) presentan una gran oportunidad de múltiples combinaciones.
- Debido a como se dió la creación del APA, la mayoría de los usuarios desarrolló su propio método basados en las instrucciones del fabricante.

La deformación que producen las ruedas metálicas son medidas mediante transductores de desplazamiento, los cuales toman medidas en 2 puntos de cada probeta. El equipo es controlado mediante una computadora, la cual tiene integrado un software que genera las gráficas de deformación. En la Figura 5.5.35 se puede observar de manera simplificada el funcionamiento del APA.

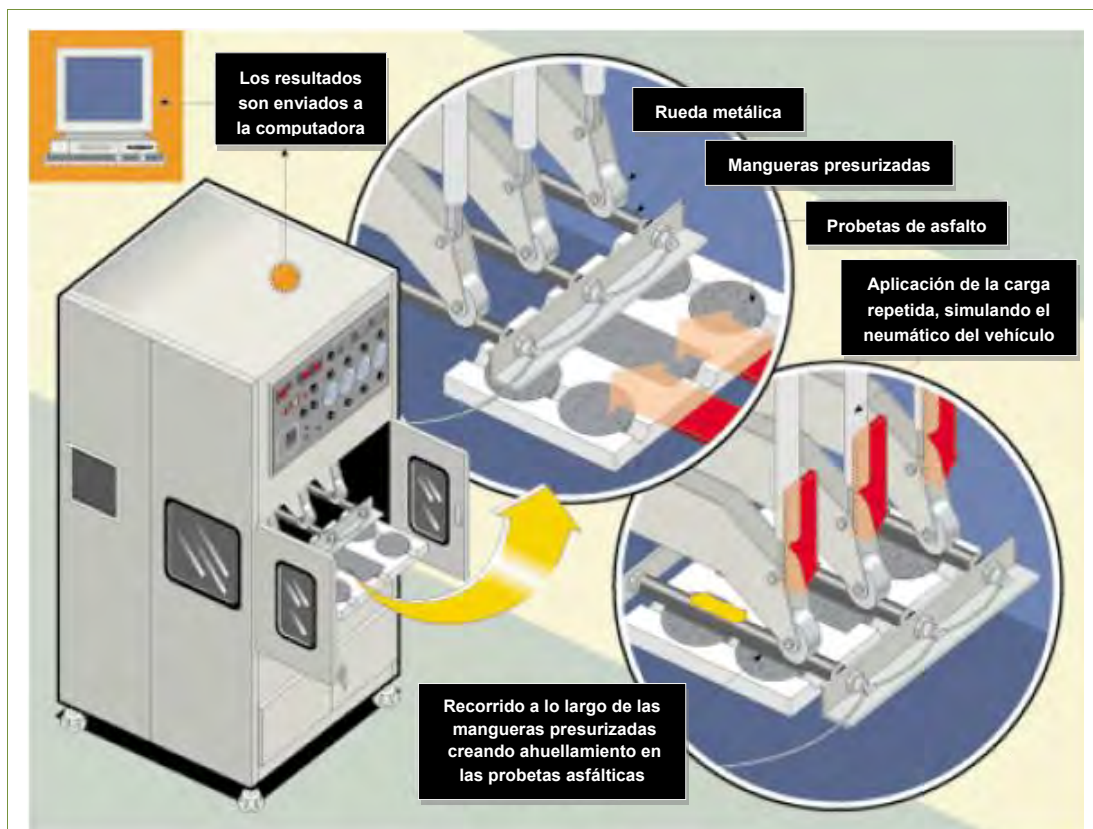


FIGURA 5.5.35

FUNCIONAMIENTO SIMPLIFICADO DEL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA”

FUENTE: <UZAROWSKI, PARADIS Y LUM (2004)>

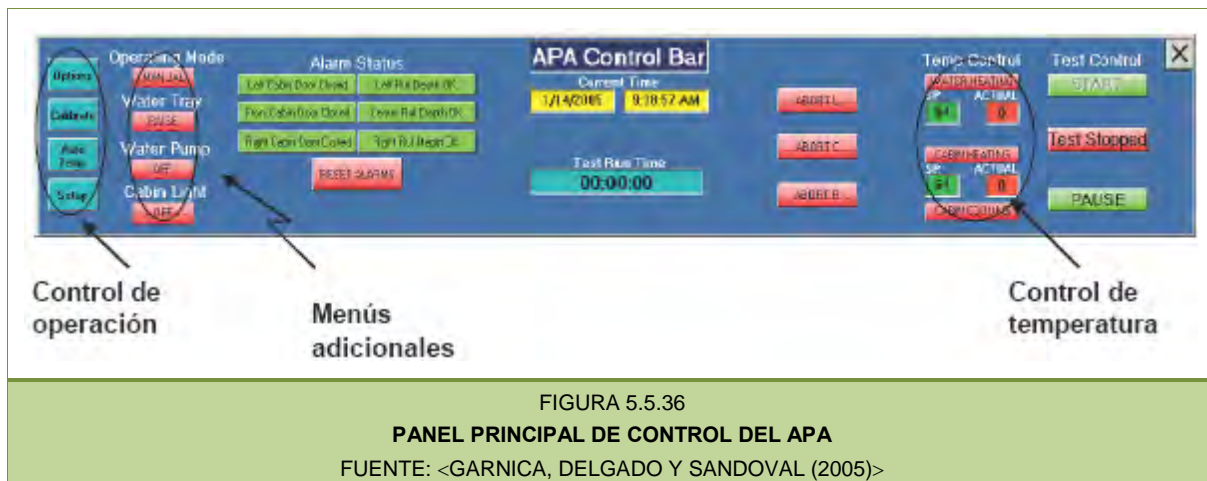


Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

2 hrs antes de iniciar el ensayo se colocaron las probetas en el horno a una temperatura de 64° C, para que pudieran tener una temperatura homogénea al momento de ser ensayadas.

Se encendió el equipo y desde el software de operación se introdujo la temperatura de la prueba en el panel de control principal (Figura 5.5.36).



Se calibraron las ruedas del APA mediante una celda de carga (Figura 5.5.38), con la finalidad de garantizar que cada rueda aplicara una fuerza de 100 lb. Durante el desarrollo del ensayo.

En el panel de control (Figura 5.5.37) se especificó el tipo de probeta, número de ciclos, presión de las mangueras, posición de los lvd't's, deformación máxima permitida. En la tabla 5.5.14 se muestran cada uno de los parámetros utilizados en los distintos ensayos.

CARACTERÍSTICA	ENSAYO DE 4" EN SECO	ENSAYO DE 4" SATURADO	ENSAYO DE 6" EN SECO
Temperatura del ensayo, en °C	64	56	64
Número de ciclos	8,000	10,000	8,000
Posición de los lvd't's	70, 100, off, 185, 215	70, 100, off, 185, 215	25, 80, Off, 210, 265
Presión de las mangueras, en lb/plg ²	100	100	100
Deformación máxima permitida, en mm	14	14	14

TABLA 5.5.14
PARÁMETROS UTILIZADOS EN LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS EN EL APA



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

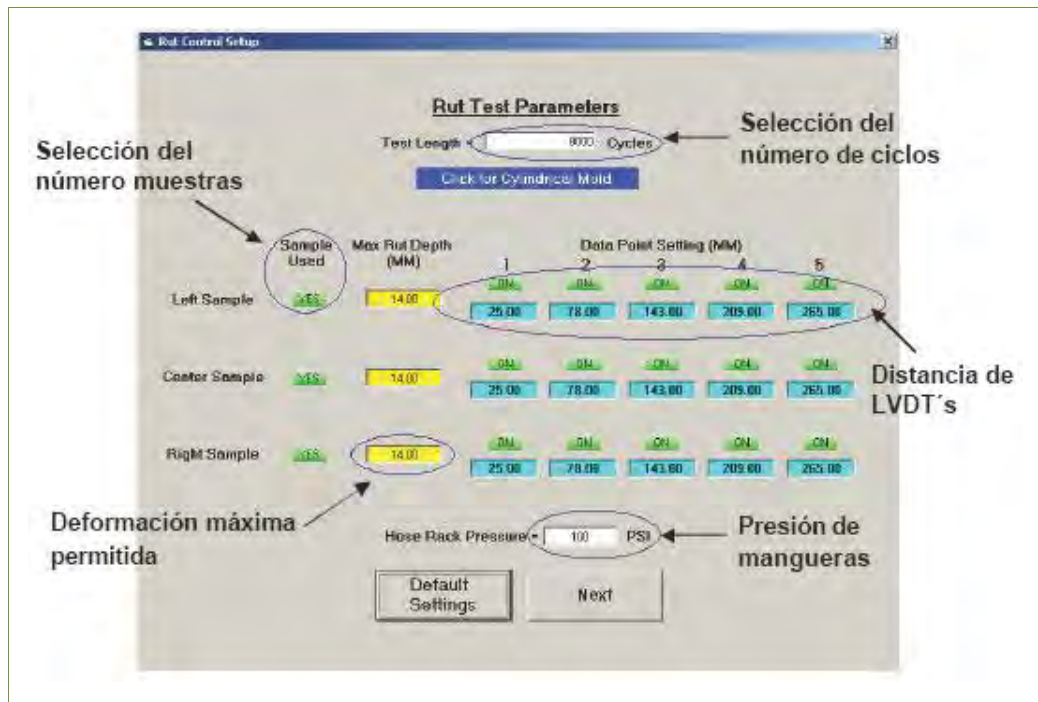


FIGURA 5.5.37
PARÁMETROS DEL PANEL DE CONTROL DEL APA
FUENTE: <GARNICA, DELGADO Y SANDOVAL (2005)>

Después del proceso de precalentamiento de las probetas (Figura 5.5.39) y una vez que el equipo alcanzó la temperatura de ensayo, se procedió a sacar las probetas del horno y se colocaron en los moldes de Naylamid, debido a que la altura del molde es de 7.5 cm y las probetas tenían solo 5 cm de alto, se vio en la necesidad de calzarlas con unas placas de acero (Figura 5.5.40).





Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

Posteriormente fueron introducidos los moldes en el APA, justo debajo de cada rueda (Figura 5.5.41).

Una vez que la temperatura del APA se volviera a homogeneizar, se inició el ensayo con los parámetros establecidos en el panel de control (Figura 5.5.42).

Terminado el ensayo se procedió a desatornillar el molde y a desmontar las probetas, para posteriormente tomar algunas fotografías y preparar el equipo para el siguiente ensayo.



Para ensayos saturados realizados en el Analizador de Pavimentos Asfálticos, se realizó el procedimiento de ensayo descrito anteriormente, se cambiaron los parámetros de la prueba, los cuales se mencionan en la Tabla 5.5.14, además al encender el equipo se cambió la condición del ensayo a saturado y en el Panel de Control mostrado en la Figura 5.5.36 se estableció la temperatura del ensayo, con lo cual el equipo subía una bandeja y empezaba a calentar automáticamente el agua.

Al término de cada ensayo el APA realiza una gráfica de la evolución de la deformación en los distintos ciclos de la prueba. Debido a la gran cantidad de lecturas que proporciona el software y la oscilación que tienen estas, se promediaron los resultados para cada 500 ciclos y se elaboró la gráfica correspondiente a cada ensayo.



RESULTADOS OBTENIDOS

En cada ensayo es posible analizar simultáneamente el comportamiento ante las deformaciones permanentes de 6 probetas, es por ello que se decidió someter al ensayo las probetas con el mismo tipo de asfalto y con los 3 porcentajes de este, así como su réplica. A continuación se mostrarán las probetas que se analizaron en cada ensayo.

ENSAYO 1

Se colocaron las probetas de 6" elaboradas con Asfalto AC-20 de Salamanca, su acomodo fue:



- La probeta 2 y 3 corresponden al 6% de Asfalto.
- La probeta 6 y 8 corresponden al 7% de Asfalto.
- La probeta 10 y 12 corresponden al 8% de Asfalto.

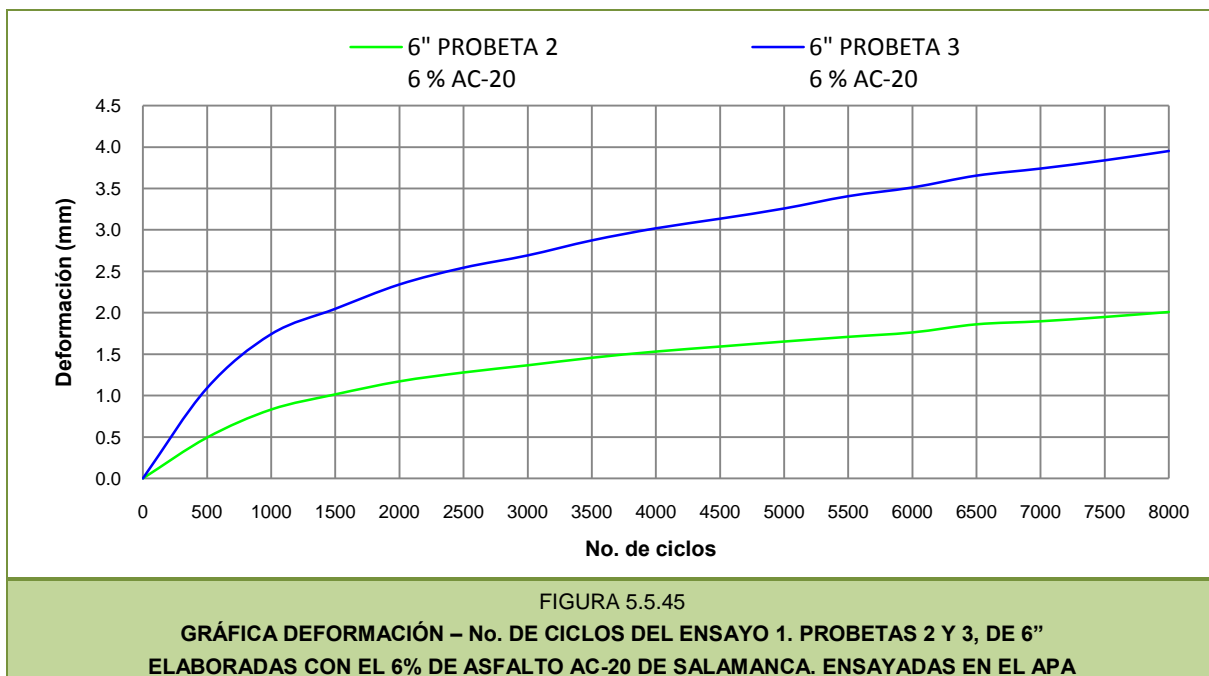
En la Tabla 5.5.15 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 2 y 3. En la Figura 5.5.44 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.45 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 2		PROBETA 3	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.49	500	1.09
1000	0.83	1000	1.74
1500	1.01	1500	2.05
2000	1.17	2000	2.34
2500	1.28	2500	2.54
3000	1.37	3000	2.69
3500	1.46	3500	2.87
4000	1.53	4000	3.02
4500	1.59	4500	3.14
5000	1.65	5000	3.26
5500	1.71	5500	3.41
6000	1.76	6000	3.51
6500	1.86	6500	3.66
7000	1.90	7000	3.74
7500	1.95	7500	3.84
8000	2.01	8000	3.95

TABLA 5.5.15
**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 1, PROBETAS 2 Y 3 DE 6"
ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Tabla 5.5.16 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 6 y 8. En la Figura 5.5.46 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.47 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 6		PROBETA 8	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.69	500	0.73
1000	1.28	1000	1.23
1500	1.68	1500	1.53
2000	1.95	2000	1.77
2500	2.17	2500	1.87
3000	2.37	3000	2.02
3500	2.60	3500	2.17
4000	2.75	4000	2.30
4500	2.90	4500	2.43
5000	3.08	5000	2.54
5500	3.19	5500	2.66
6000	3.36	6000	2.80
6500	3.54	6500	2.95
7000	3.61	7000	3.02
7500	3.74	7500	3.13
8000	3.84	8000	3.25

TABLA 5.5.16
RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 1, PROBETAS 6 Y 8 DE 6”
ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA





Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

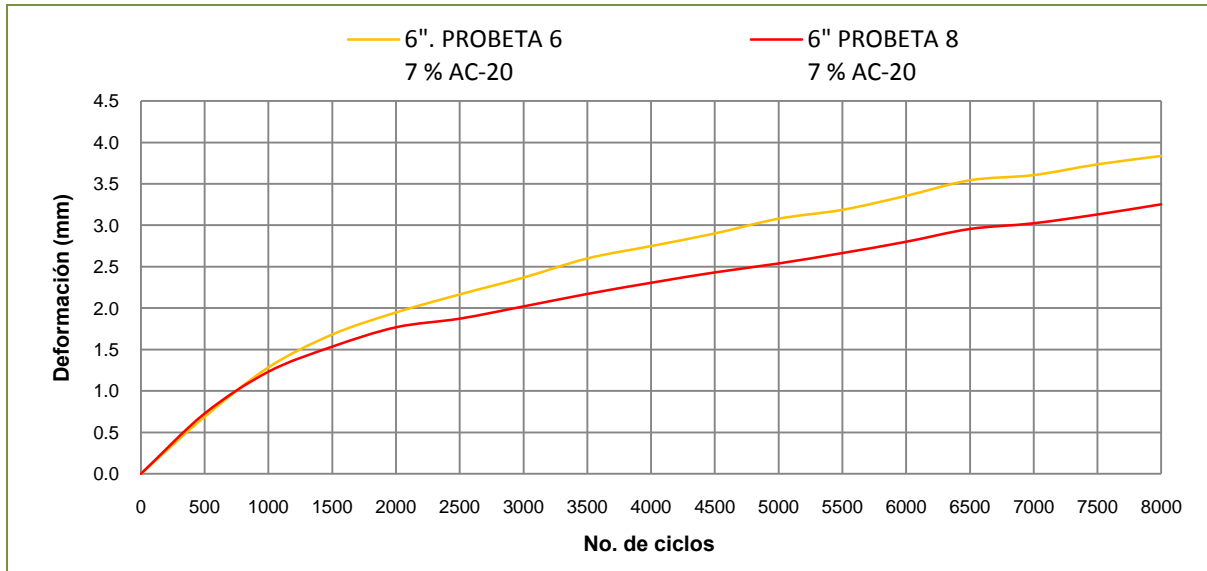


FIGURA 5.5.47
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 1. PROBETAS 6 Y 8, DE 6"
ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA

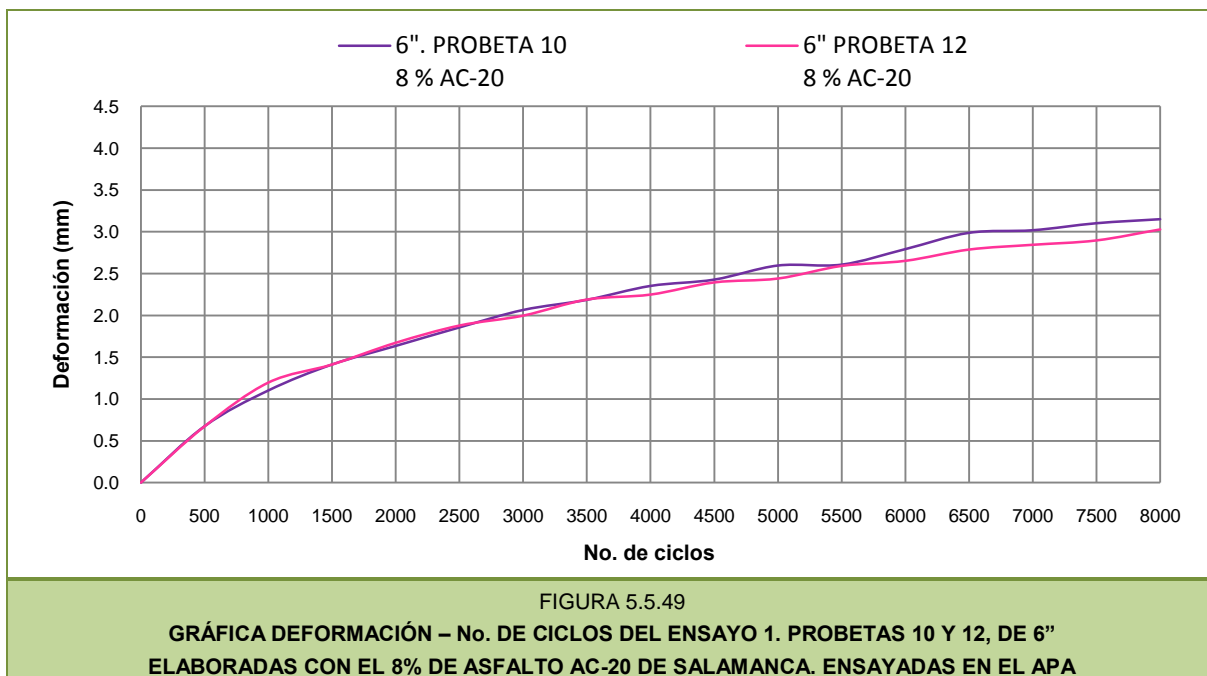
En la Tabla 5.5.17 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 10 y 12. En la Figura 5.5.48 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.49 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 10		PROBETA 12	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.67	500	0.67
1000	1.10	1000	1.20
1500	1.41	1500	1.41
2000	1.63	2000	1.67
2500	1.86	2500	1.88
3000	2.06	3000	2.00
3500	2.18	3500	2.19
4000	2.35	4000	2.25
4500	2.43	4500	2.40
5000	2.60	5000	2.44
5500	2.61	5500	2.59
6000	2.79	6000	2.65
6500	2.99	6500	2.79
7000	3.02	7000	2.85
7500	3.10	7500	2.90
8000	3.15	8000	3.03

TABLA 5.5.17
RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 1, PROBETAS 10 Y 12 DE 6"
ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA



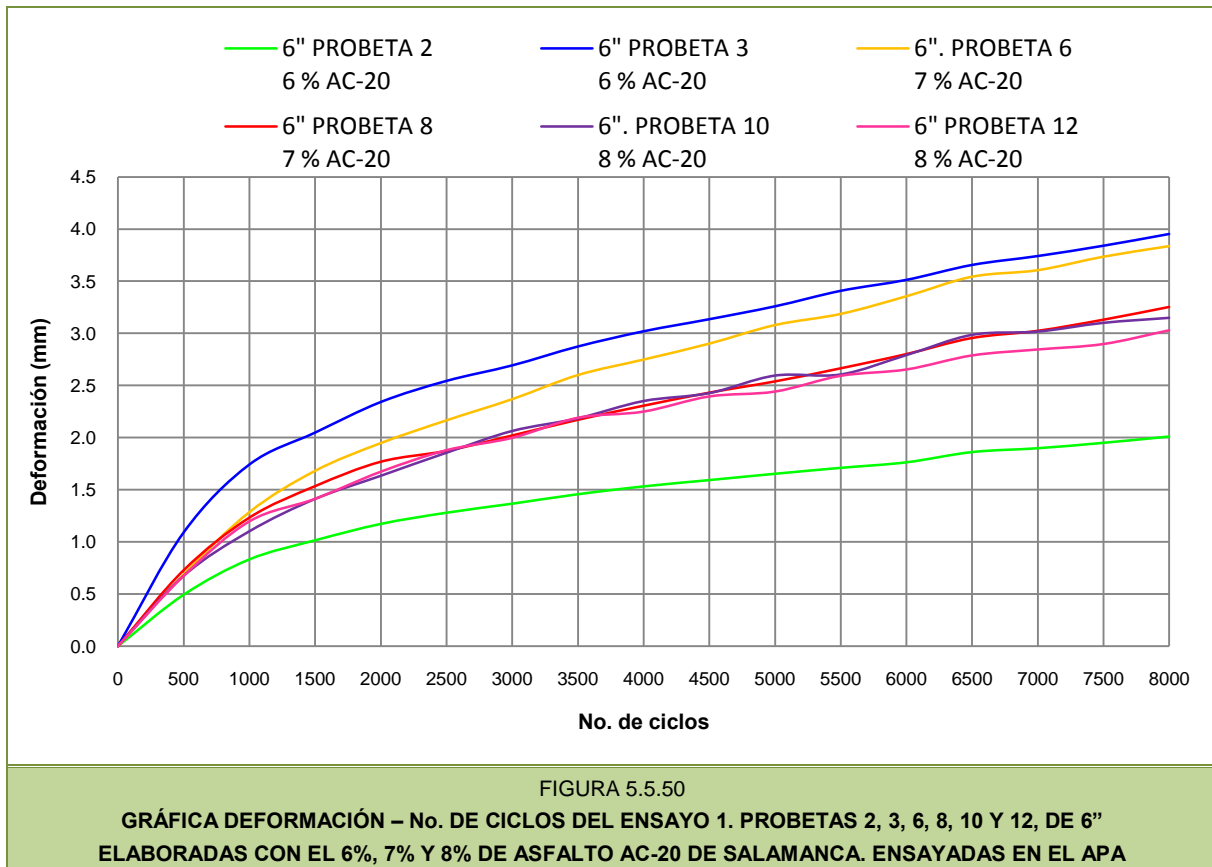
Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.50 se pueden observar todas las gráficas de Deformación – No. de ciclos de los ensayos realizados con las probetas de 6", elaboradas con AC – 20 de Salamanca.



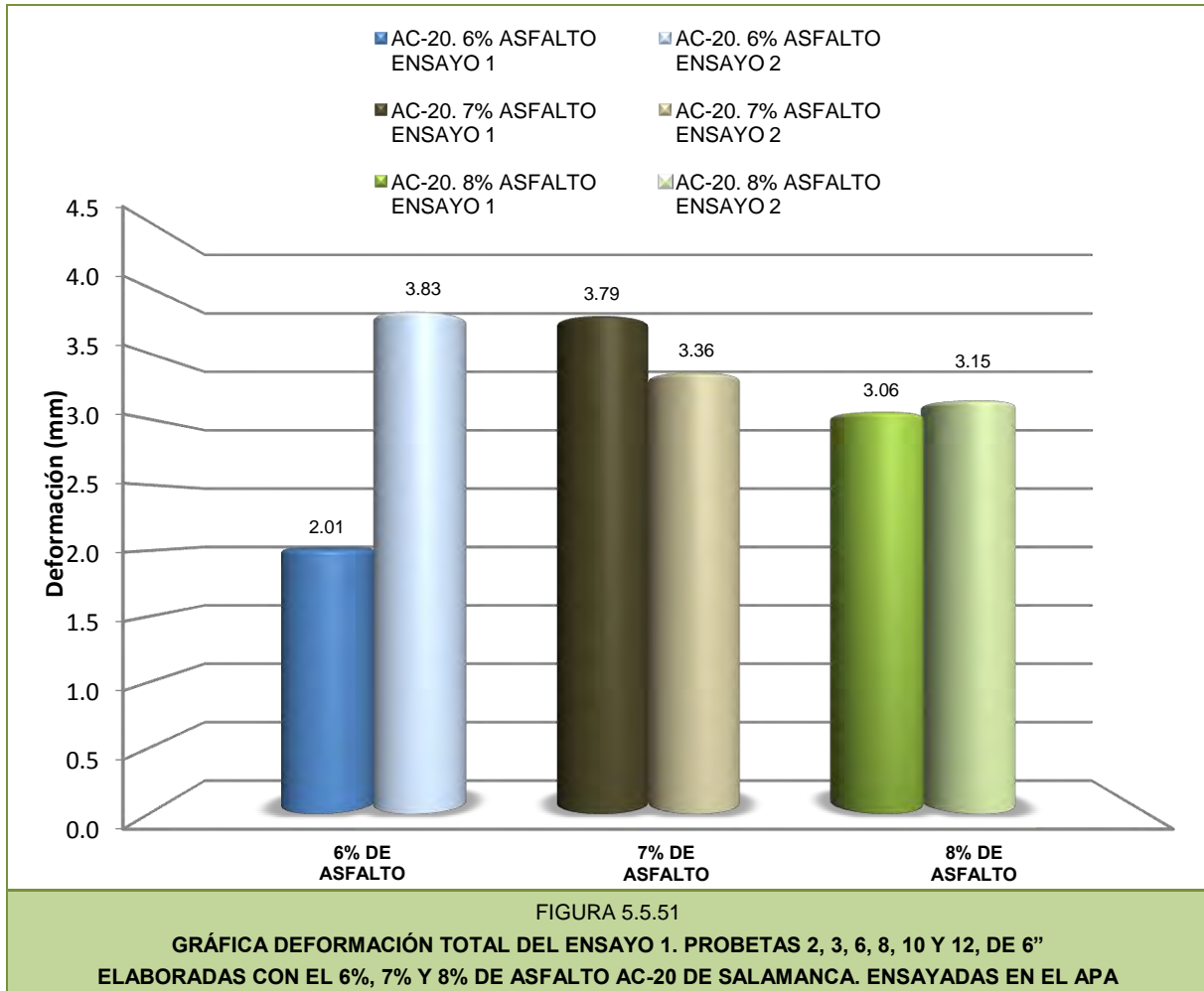
Como se puede observar la probeta 3 prácticamente se deforma el doble de la probeta 2. En los primeros 1,000 el comportamiento de las probetas 6 y 8 tienen un comportamiento similar, posteriormente la probeta 6 se empieza a deformar más. En general las probetas 10 y 12 tienen un comportamiento similar. Estas comparaciones están realizadas con las probetas que tienen el mismo contenido asfáltico.

Se debe recordar que estos datos son el resultado del promedio obtenido a cada 500 ciclos, por lo que al analizar la gráfica de la deformación total obtenida para cada ensayo se determinará si se descartará alguno de estos para la realización del análisis de resultados.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.51 se puede observar la deformación total obtenida en el ensayo 1 de las Probetas 2, 3, 6, 8, 10 y 12. Fabricadas con AC – 20 de Salamanca.



Como se puede observar, la deformación total de las probetas elaboradas con los 3 distintos contenidos asfálticos y comparadas con su réplica es relativamente la misma, a excepción de las que contienen el 6% de asfalto.

Para el análisis de resultados no se descartará ningún ensayo y se realizarán las gráficas de las deformaciones promedio de las probetas fabricadas con el mismo porcentaje de asfalto.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ENSAYO 2

Se colocaron las probetas de 6” elaboradas con Asfalto modificado, su acomodo fue:



- La probeta 1 y 2 corresponden al 6% de Asfalto.
- La probeta 5 y 6 corresponden al 7% de Asfalto.
- La probeta 10 y 13 corresponden al 8% de Asfalto.

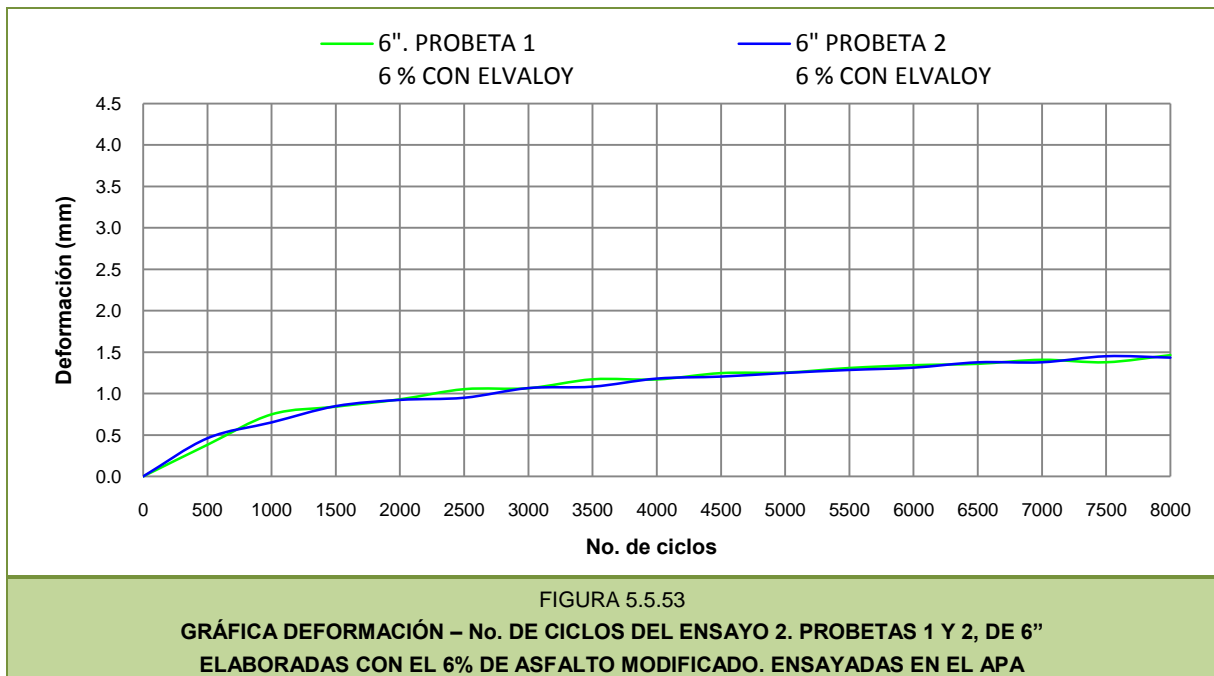
En la Tabla 5.5.18 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 1 y 2. En la Figura 5.5.52 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.53 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 1		PROBETA 2	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.38	500	0.46
1000	0.75	1000	0.65
1500	0.84	1500	0.85
2000	0.93	2000	0.92
2500	1.05	2500	0.95
3000	1.06	3000	1.07
3500	1.17	3500	1.08
4000	1.17	4000	1.18
4500	1.25	4500	1.21
5000	1.25	5000	1.25
5500	1.31	5500	1.29
6000	1.34	6000	1.31
6500	1.36	6500	1.38
7000	1.41	7000	1.38
7500	1.38	7500	1.45
8000	1.46	8000	1.44

TABLA 5.5.18
**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 2, PROBETAS 1 Y 2 DE 6”
ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

En la Tabla 5.5.19 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 5 y 6. En la Figura 5.5.54 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.55 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

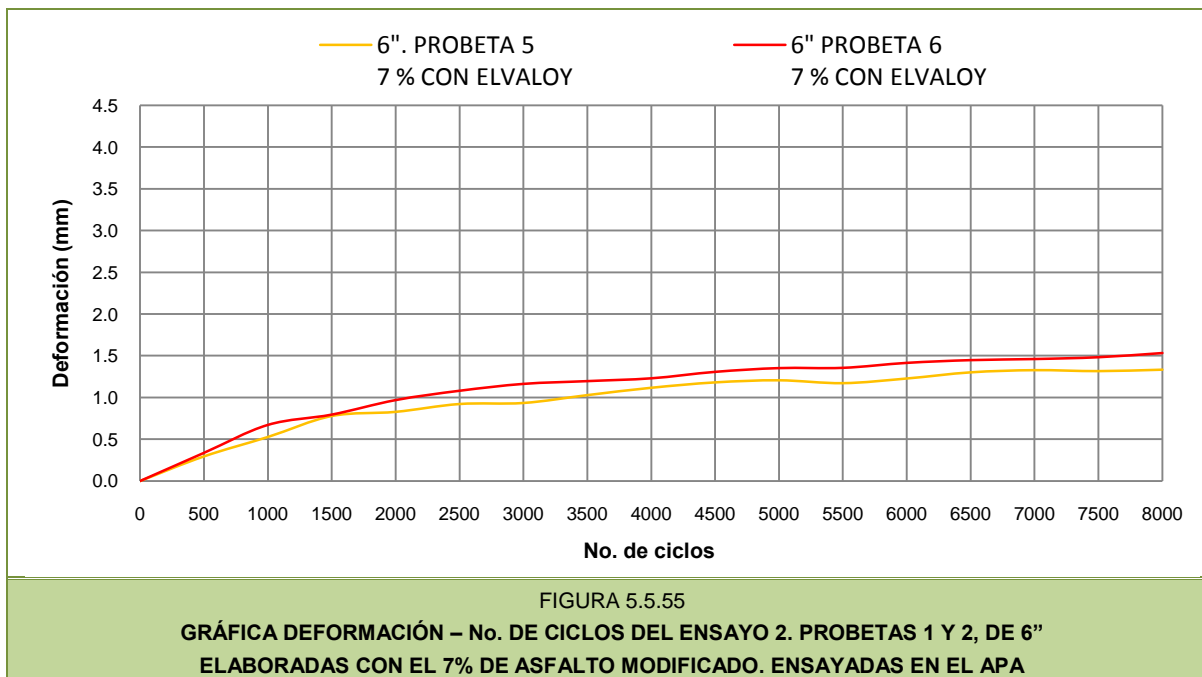
PROBETA 5		PROBETA 6	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.29	500	0.34
1000	0.53	1000	0.67
1500	0.78	1500	0.80
2000	0.83	2000	0.97
2500	0.92	2500	1.08
3000	0.93	3000	1.16
3500	1.03	3500	1.20
4000	1.12	4000	1.23
4500	1.18	4500	1.31
5000	1.21	5000	1.35
5500	1.17	5500	1.35
6000	1.23	6000	1.41
6500	1.30	6500	1.45
7000	1.33	7000	1.46
7500	1.31	7500	1.48
8000	1.33	8000	1.53

TABLA 5.5.19
**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 2, PROBETAS 5 Y 6 DE 4”
ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA**





Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



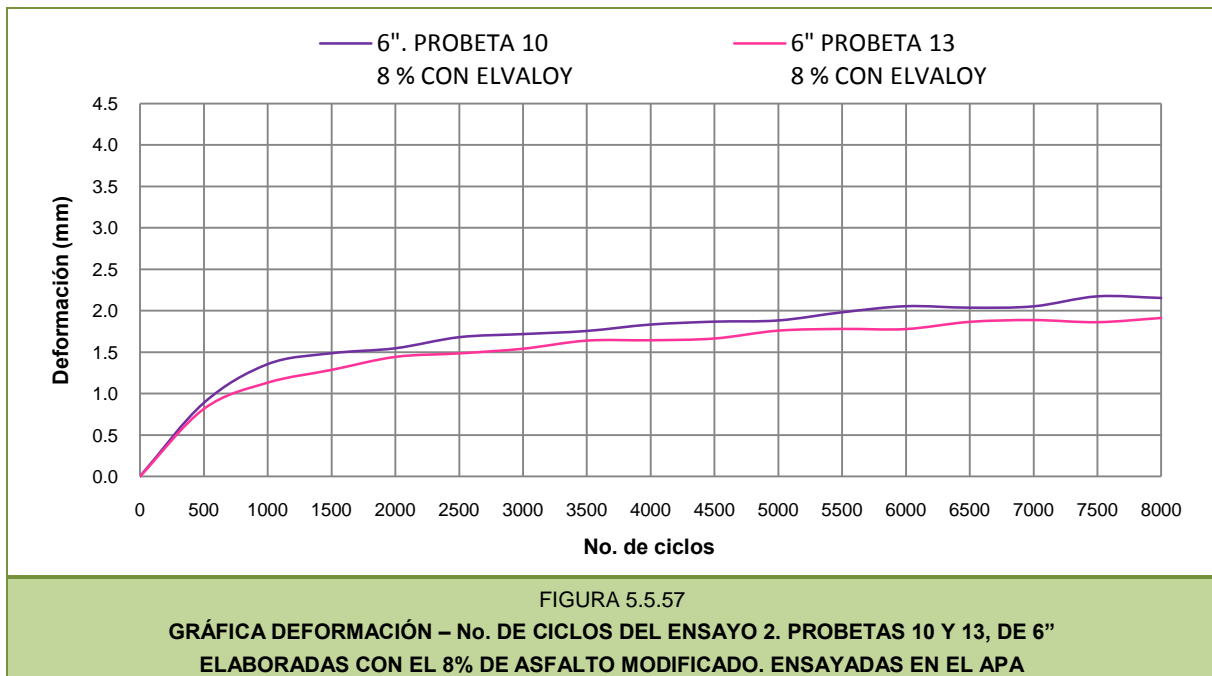
En la Tabla 5.5.20 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 5 y 6. En la Figura 5.5.56 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.57 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 10		PROBETA 13	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.89	500	0.82
1000	1.36	1000	1.13
1500	1.49	1500	1.29
2000	1.55	2000	1.44
2500	1.68	2500	1.49
3000	1.72	3000	1.54
3500	1.76	3500	1.64
4000	1.83	4000	1.64
4500	1.87	4500	1.67
5000	1.88	5000	1.76
5500	1.98	5500	1.78
6000	2.06	6000	1.78
6500	2.04	6500	1.87
7000	2.05	7000	1.89
7500	2.17	7500	1.86
8000	2.16	8000	1.91

TABLA 5.5.20
**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 2, PROBETAS 10 Y 13 DE 6”
ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA**



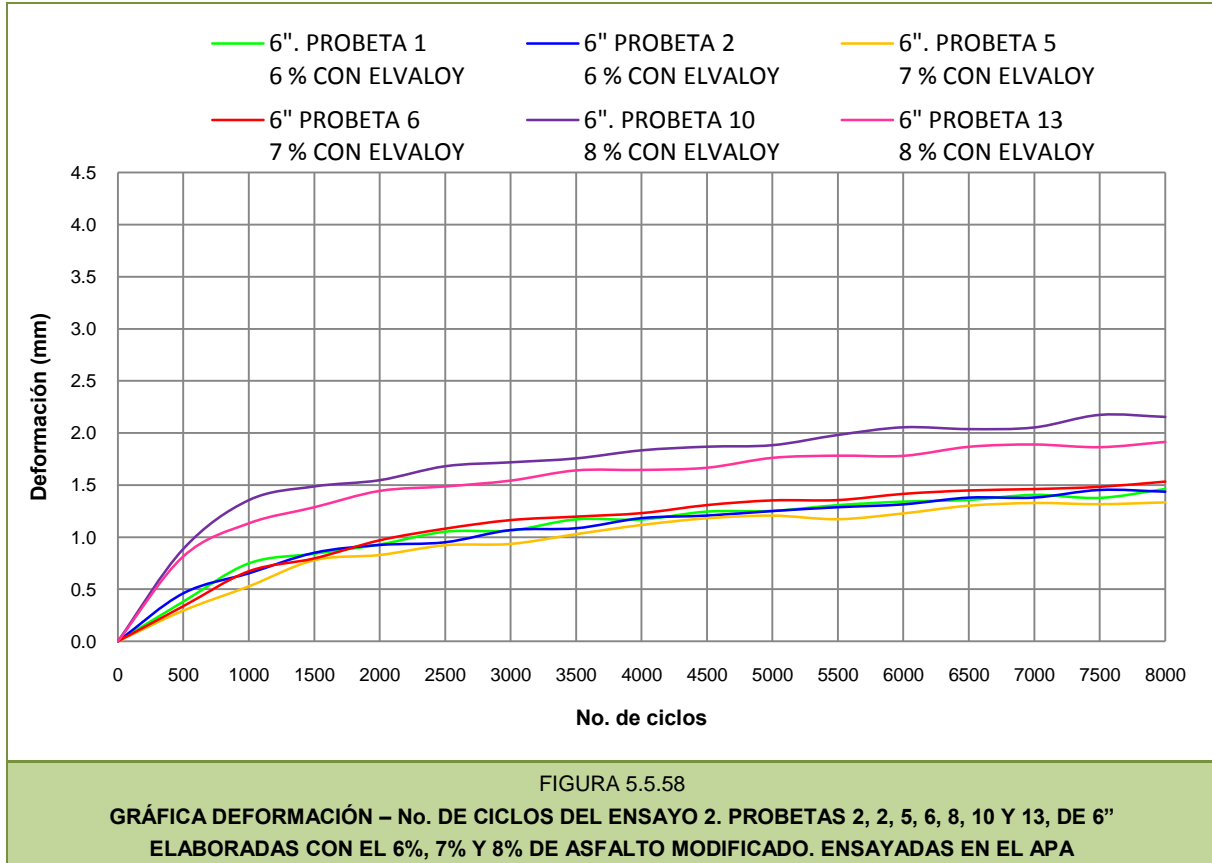
Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.50 se pueden observar todas las gráficas de Deformación – No. de ciclos de los ensayos realizados con las probetas de 6”, elaboradas con Asfalto modificado.



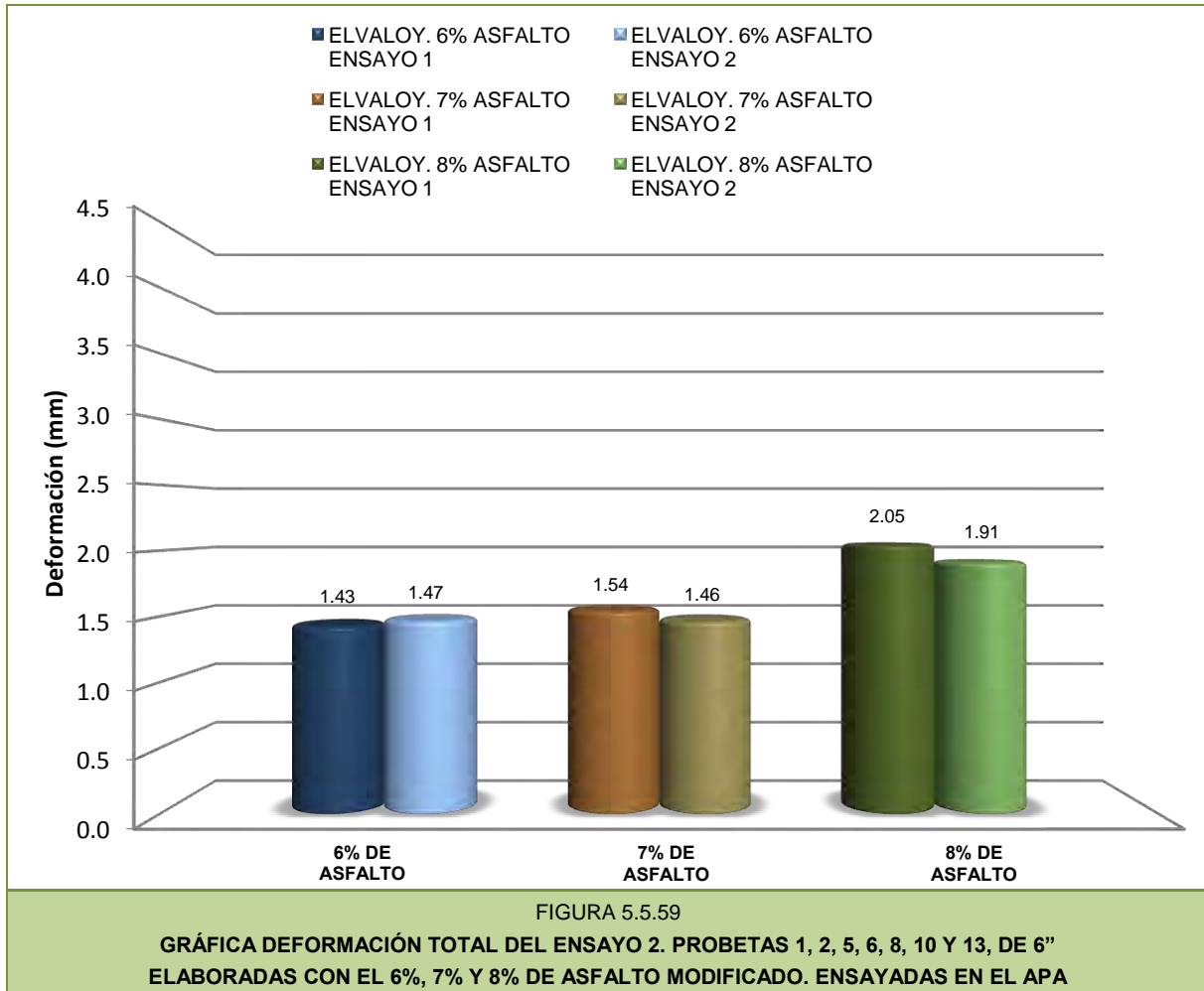
Como se puede observar la probeta 1 y 2 prácticamente se deforma de manera similar. En general la deformación de las probetas 5 y 6 tiene un comportamiento similar. La probeta 10 se deforma ligeramente más que la probeta 13. Estas comparaciones están realizadas con las probetas que tienen el mismo contenido asfáltico.

Se debe recordar que estos datos son el resultado del promedio obtenido a cada 500 ciclos, por lo que al analizar la gráfica de la deformación total obtenida para cada ensayo se determinará si se descartará algún de estos para la realización del análisis de resultados.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.51 se puede observar la deformación total obtenida en el ensayo 2 de las Probetas 1, 2, 5, 6, 10 y 13. Fabricadas con Asfalto modificado.



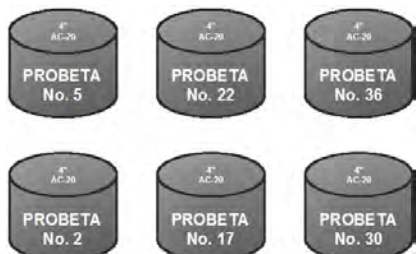
Como se puede observar, la deformación total de las probetas elaboradas con los 3 distintos contenidos asfálticos y comparadas con su réplica es prácticamente la misma.

Para el análisis de resultados no se descartará ningún ensayo y se realizarán las gráficas de las deformaciones promedio de las probetas fabricadas con el mismo porcentaje de asfalto.



ENSAYO 3

Se colocaron las probetas de 4" elaboradas con Asfalto AC-20 de Salamanca, su acomodo fue:



- La probeta 2 y 5 corresponden al 6% de Asfalto.
- La probeta 17 y 22 corresponden al 7% de Asfalto.
- La probeta 30 y 36 corresponden al 8% de Asfalto.

En la Tabla 5.5.21 se puede observar los resultados del ensayo de las probetas 2 y 5. En la Figura 5.5.60 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.61 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 2		PROBETA 5	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.25	500	0.41
1000	0.42	1000	0.54
1500	0.49	1500	0.58
2000	0.60	2000	0.64
2500	0.67	2500	0.69
3000	0.79	3000	0.76
3500	0.83	3500	0.83
4000	0.91	4000	0.91
4500	0.99	4500	1.00
5000	1.08	5000	1.10
5500	1.17	5500	1.09
6000	1.23	6000	1.18
6500	1.36	6500	1.23
7000	1.36	7000	1.27
7500	1.44	7500	1.30
8000	1.48	8000	1.39

TABLA 5.5.21
RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 3, PROBETAS 2 Y 5 DE 4" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.60
ENSAYO 3, PROBETAS 2 Y 5. DE 4". ELABORADAS CON EL 6%
DE AC-20 DE ASFALTO SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA

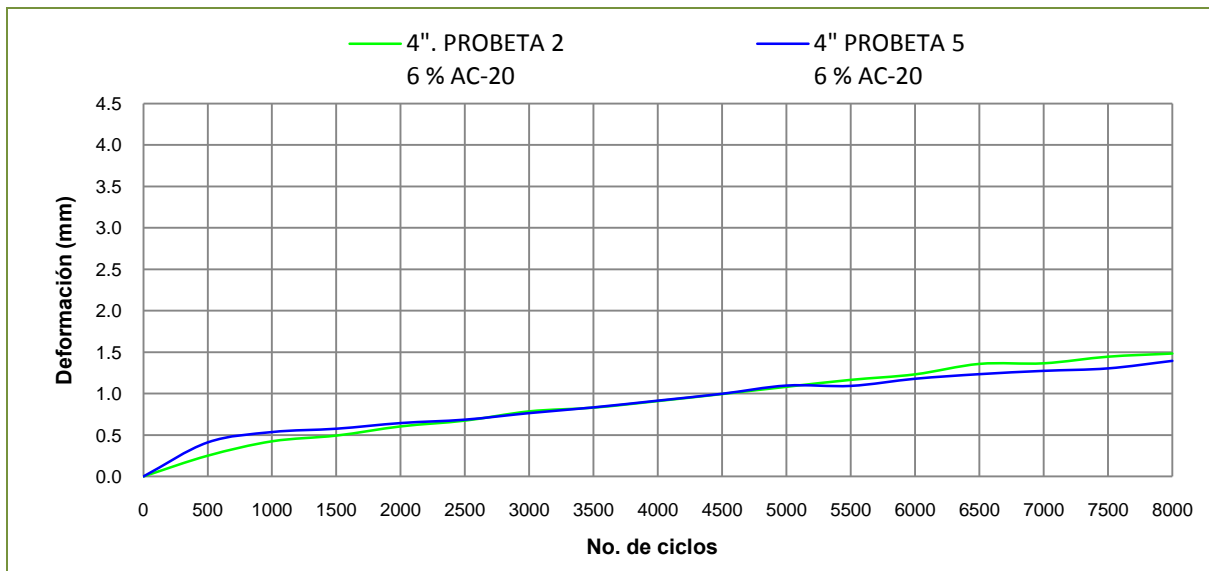


FIGURA 5.5.61
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 3. PROBETAS 2 Y 5, DE 4"
ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

En la Tabla 5.5.22 se puede observar los resultados del ensayo de las probetas 17 y 22. En la Figura 5.5.62 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.63 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

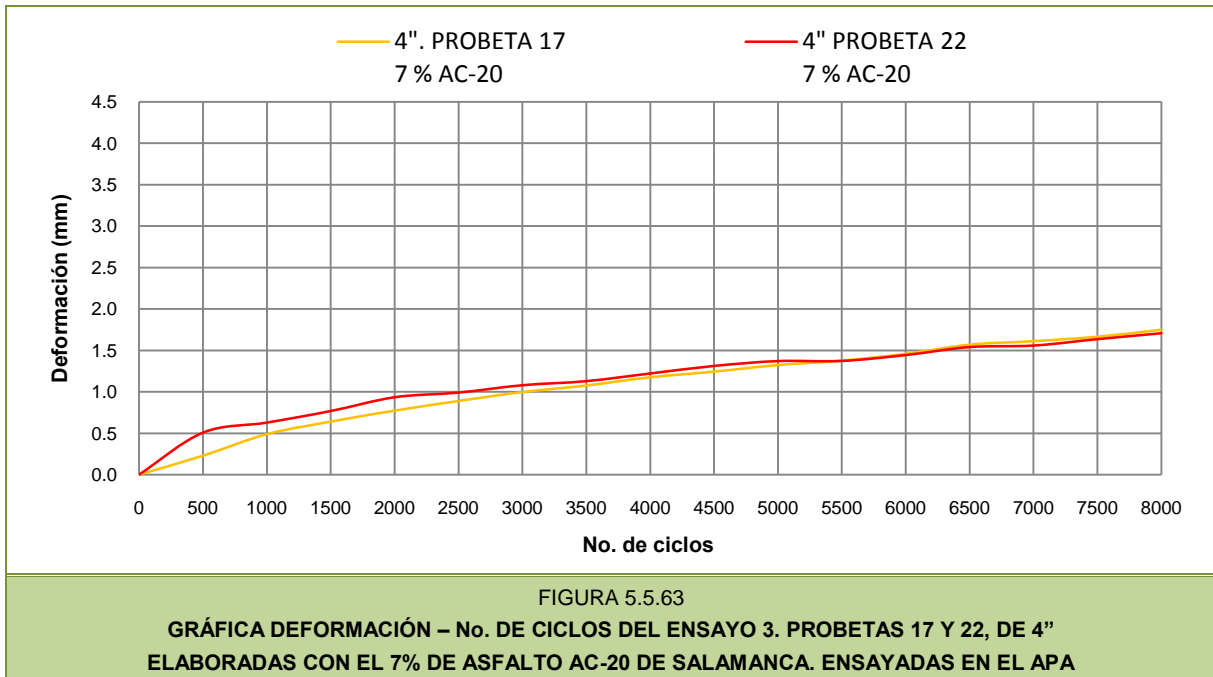
PROBETA 17		PROBETA 22	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.23	500	0.51
1000	0.49	1000	0.63
1500	0.64	1500	0.77
2000	0.77	2000	0.94
2500	0.89	2500	0.99
3000	1.00	3000	1.08
3500	1.08	3500	1.13
4000	1.18	4000	1.22
4500	1.25	4500	1.31
5000	1.32	5000	1.37
5500	1.38	5500	1.37
6000	1.46	6000	1.45
6500	1.57	6500	1.54
7000	1.61	7000	1.56
7500	1.67	7500	1.64
8000	1.75	8000	1.71

TABLA 5.5.22
**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 3, PROBETAS 17 Y 22 DE 4”
ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA**





Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio



En la Tabla 5.5.23 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 30 y 36. En la Figura 5.5.64 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.65 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 30		PROBETA 36	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.11	500	0.22
1000	0.13	1000	0.43
1500	0.10	1500	0.54
2000	0.15	2000	0.62
2500	0.20	2500	0.64
3000	0.24	3000	0.67
3500	0.26	3500	0.72
4000	0.31	4000	0.77
4500	0.38	4500	0.82
5000	0.41	5000	0.85
5500	0.42	5500	0.83
6000	0.46	6000	0.92
6500	0.49	6500	0.92
7000	0.52	7000	0.92
7500	0.54	7500	0.96
8000	0.58	8000	0.96

TABLA 5.5.23
RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 3, PROBETAS 30 Y 36 DE 4”
ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC -20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.64
ENSAYO 3, PROBETAS 30 Y 36. DE 4". ELABORADAS CON
EL 8% DE AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA

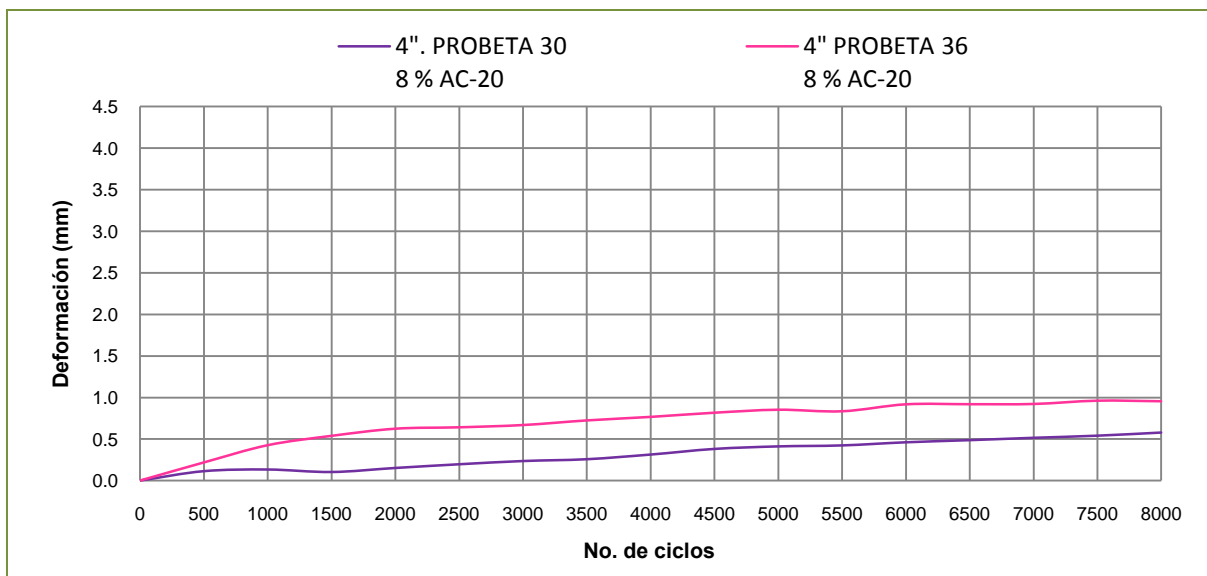


FIGURA 5.5.65
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 3. PROBETAS 30 Y 36, DE 4"
ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.66 se pueden observar todas las gráficas de Deformación – No. de ciclos de los ensayos realizados con las probetas de 4", elaboradas con Ac – 20 de Salamanca.

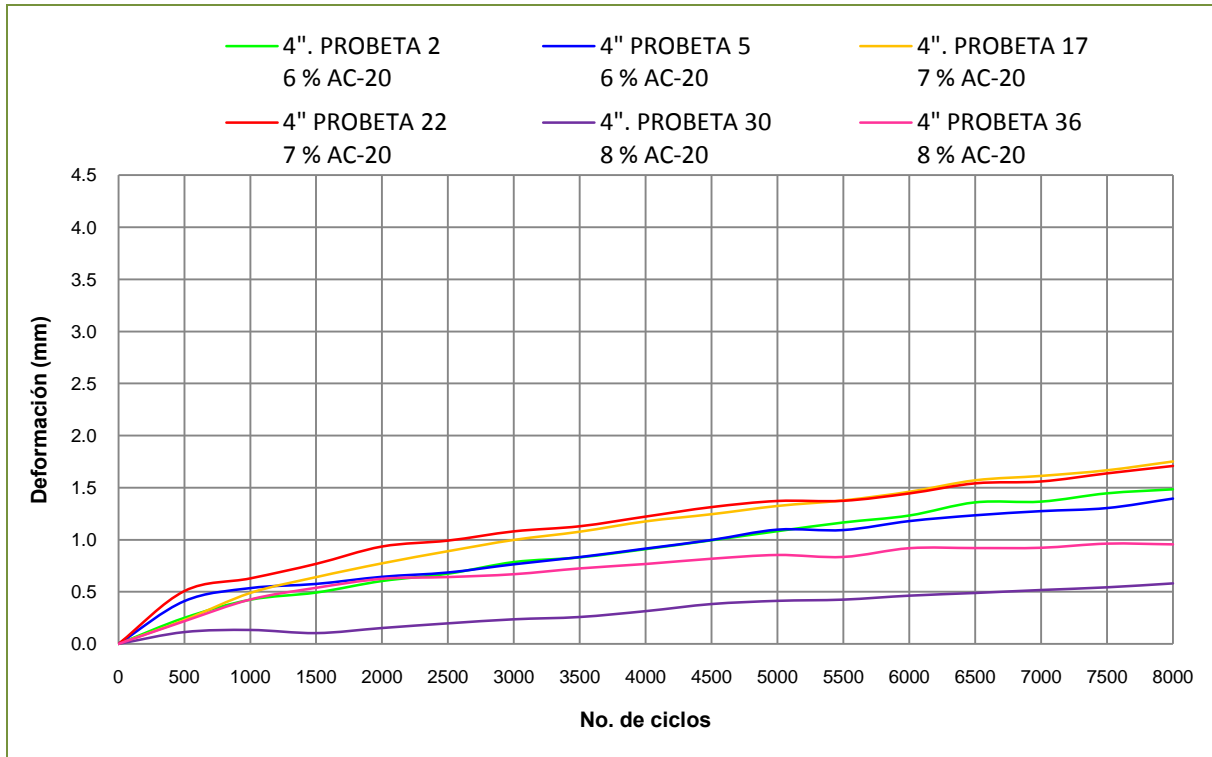


FIGURA 5.5.66

GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 3. PROBETAS 2, 5, 17, 22, 30 Y 36, DE 4" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN EL APA

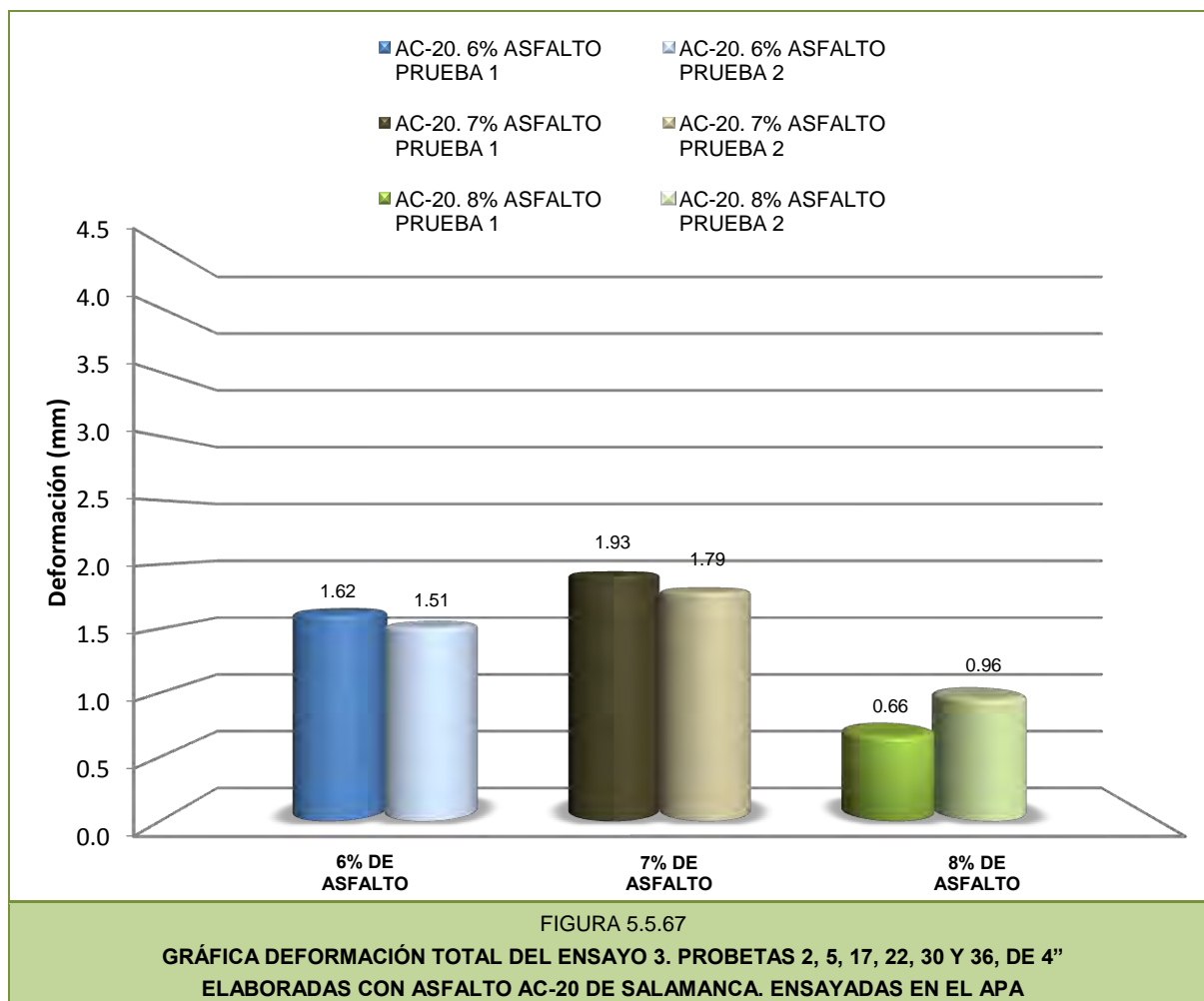
Como se puede observar la probeta 2 y 5 prácticamente tienen un comportamiento similar. Las probetas 17 y 22 se deforman casi lo mismo. La probeta 36 se deforma más que la probeta 30. Estas comparaciones están realizadas con las probetas que tienen el mismo contenido asfáltico.

Se debe recordar que estos datos son el resultado del promedio obtenido a cada 500 ciclos, por lo que al analizar la gráfica de la deformación total obtenida para cada ensayo se determinará si se descartará algún de estos para la realización del análisis de resultados.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.51 se puede observar la deformación total obtenida en el ensayo 3 de las Probetas 2, 5, 17, 22, 30 y 36. Fabricadas con AC – 20 de Salamanca.



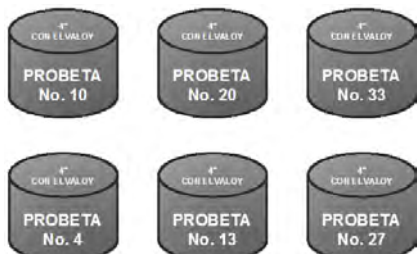
Como se puede observar, la deformación total de las probetas elaboradas con los 3 distintos contenidos asfálticos y comparadas con su réplica es muy similar.

Para el análisis de resultados no se descartará ningún ensayo y se realizarán las gráficas de las deformaciones promedio de las probetas fabricadas con el mismo porcentaje asfáltico.



ENSAYO 4

Se colocaron las probetas de 6” elaboradas con Asfalto modificado, su acomodo fue:



- La probeta 4 y 10 corresponden al 6% de Asfalto.
- La probeta 13 y 20 corresponden al 7% de Asfalto.
- La probeta 27 y 33 corresponden al 8% de Asfalto.

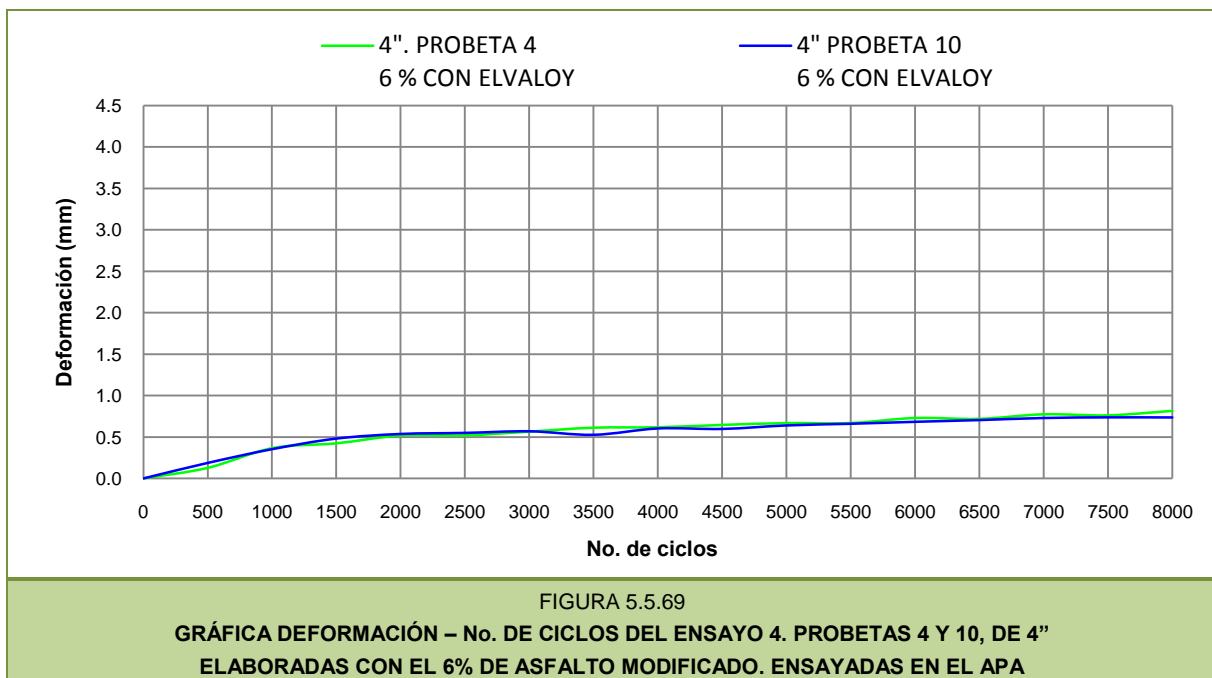
En la Tabla 5.5.24 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 4 y 10. En la Figura 5.5.68 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.69 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 4		PROBETA 10	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.13	500	0.19
1000	0.37	1000	0.35
1500	0.42	1500	0.48
2000	0.52	2000	0.54
2500	0.52	2500	0.55
3000	0.57	3000	0.57
3500	0.61	3500	0.53
4000	0.62	4000	0.60
4500	0.65	4500	0.60
5000	0.67	5000	0.64
5500	0.67	5500	0.66
6000	0.73	6000	0.68
6500	0.72	6500	0.70
7000	0.78	7000	0.73
7500	0.76	7500	0.74
8000	0.82	8000	0.73

TABLA 5.5.24
**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 4, PROBETAS 4 Y 10 DE 4”
ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Tabla 5.5.25 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 13 y 20. En la Figura 5.5.70 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.71 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 13		PROBETA 20	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.09	500	0.05
1000	0.36	1000	0.32
1500	0.45	1500	0.44
2000	0.54	2000	0.52
2500	0.61	2500	0.58
3000	0.61	3000	0.64
3500	0.63	3500	0.63
4000	0.69	4000	0.67
4500	0.70	4500	0.69
5000	0.72	5000	0.72
5500	0.73	5500	0.80
6000	0.79	6000	0.79
6500	0.79	6500	0.87
7000	0.79	7000	0.92
7500	0.84	7500	0.90
8000	0.83	8000	0.98

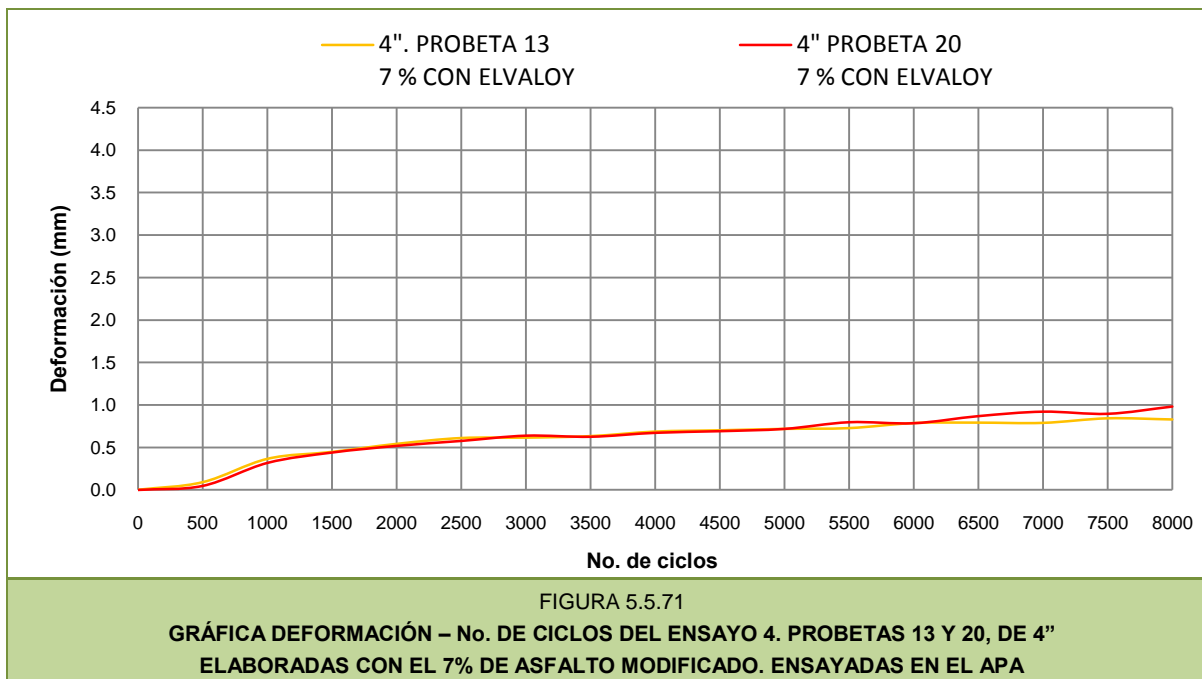
TABLA 5.5.25
RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 4, PROBETAS 13 Y 20 DE 4"
ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA



FIGURA 5.5.70
ENSAYO 4, PROBETAS 13 Y 20. DE 4". ELABORADAS CON
EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



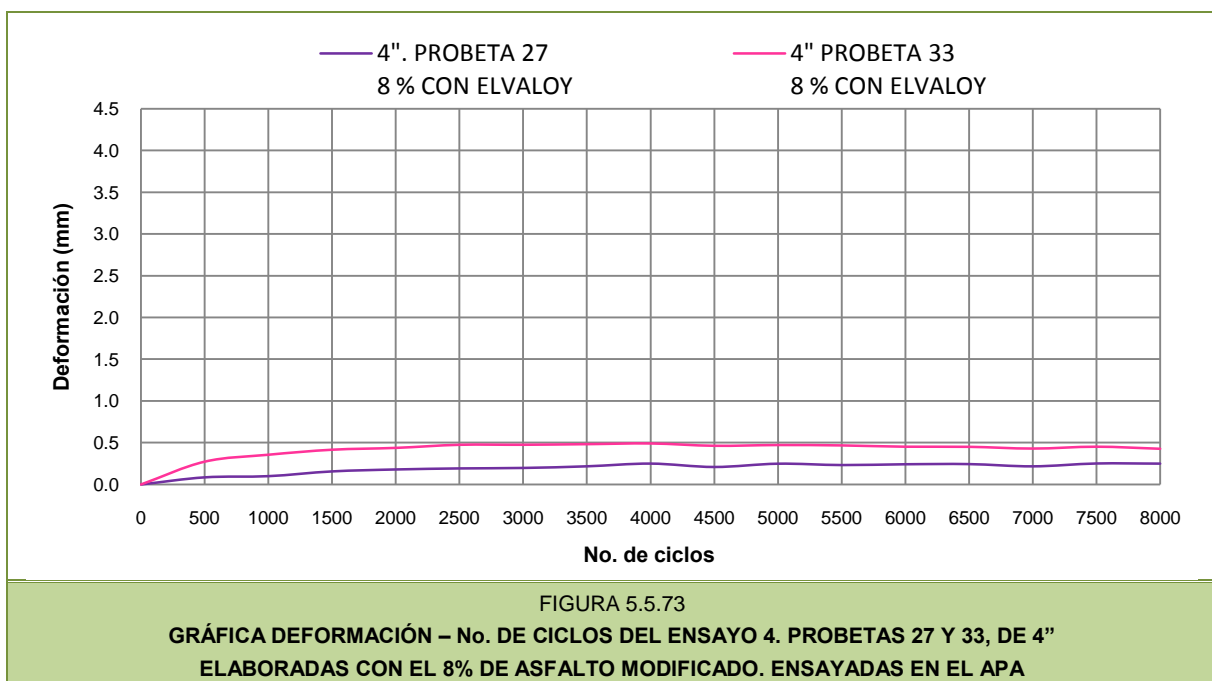
En la Tabla 5.5.26 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 5 y 6. En la Figura 5.5.72 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.73 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 27		PROBETA 33	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.08	500	0.27
1000	0.10	1000	0.35
1500	0.15	1500	0.41
2000	0.18	2000	0.44
2500	0.19	2500	0.47
3000	0.20	3000	0.47
3500	0.21	3500	0.48
4000	0.25	4000	0.49
4500	0.21	4500	0.46
5000	0.25	5000	0.47
5500	0.23	5500	0.46
6000	0.24	6000	0.45
6500	0.24	6500	0.45
7000	0.21	7000	0.43
7500	0.25	7500	0.45
8000	0.25	8000	0.43

TABLA 5.5.26
RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 4, PROBETAS 27 Y 33 DE 4”
ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.74 se pueden observar todas las gráficas de Deformación – No. de ciclos de los ensayos realizados con las probetas de 4", elaboradas con Asfalto modificado.

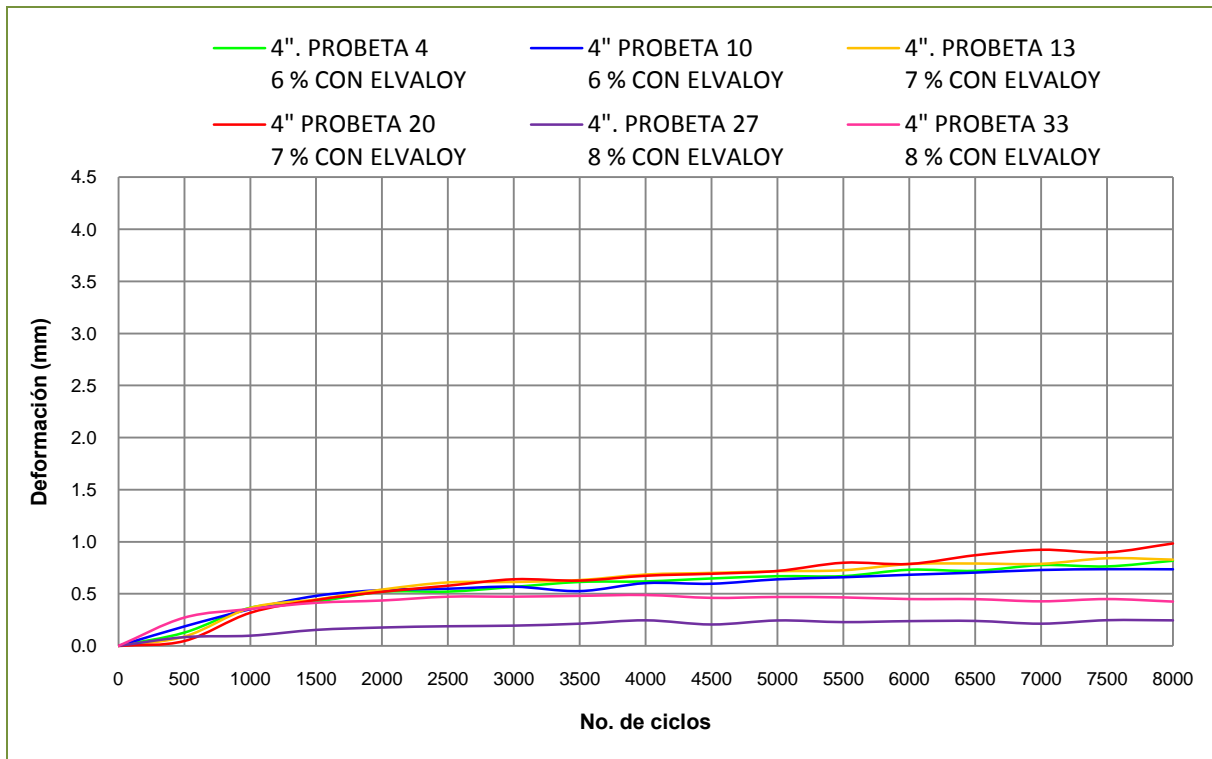


FIGURA 5.5.74

GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 4. PROBETAS 4, 10, 13, 20, 27, Y 33, DE 4\"

ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL APA

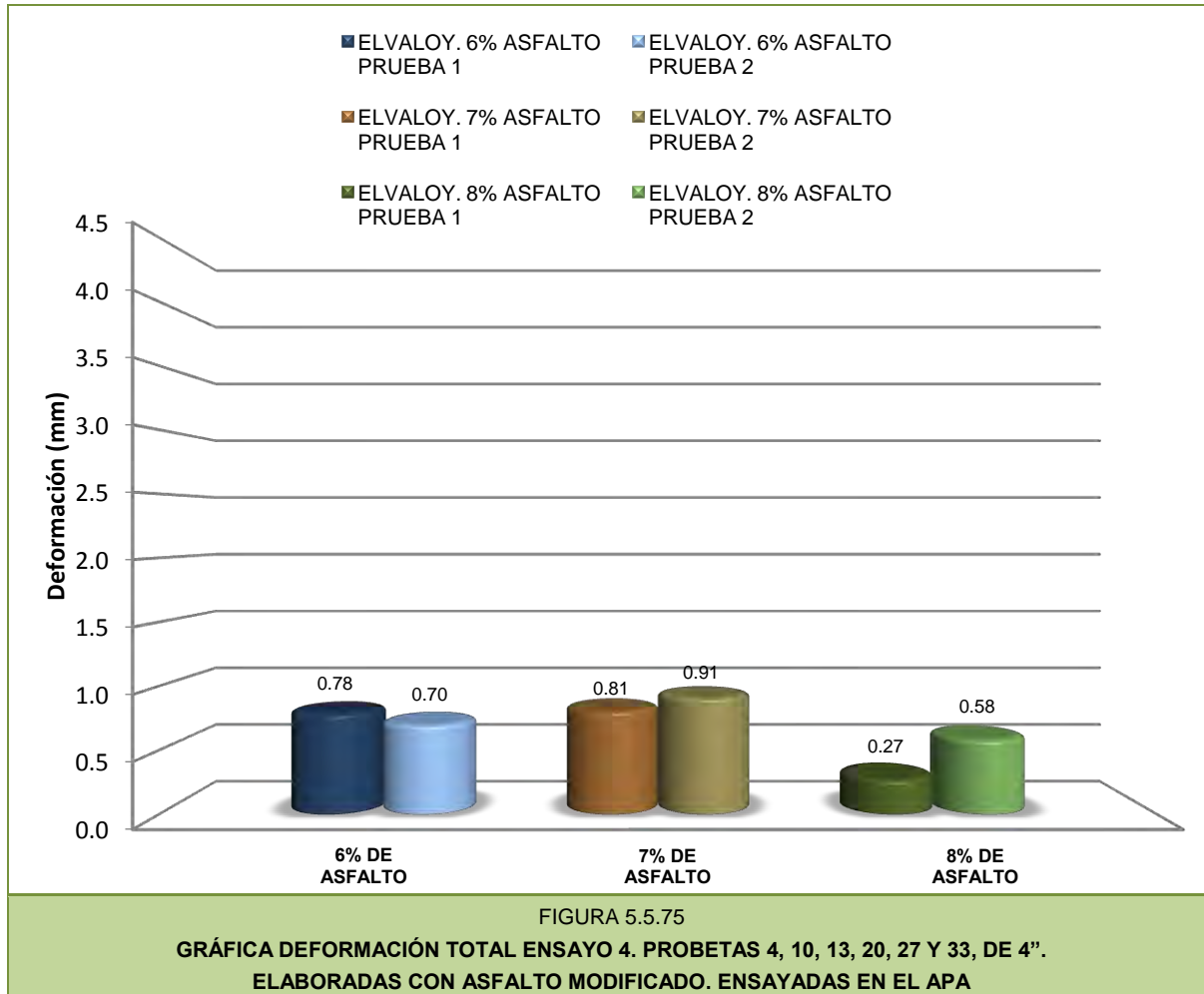
Como se puede observar, las probetas 4 y 10 prácticamente se deforman lo mismo. La deformación de las probetas 13 y 20 tiene un comportamiento similar. La probeta 33 se deforma ligeramente más que la probeta 27. Estas comparaciones están realizadas con las probetas que tienen el mismo contenido asfáltico.

Se debe recordar que estos datos son el resultado del promedio obtenido a cada 500 ciclos, por lo que al analizar la gráfica de la deformación total obtenida para cada ensayo se determinará si se descartará alguno de estos para la realización del análisis de resultados.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.51 se puede observar la deformación total obtenida en el ensayo 4 de las Probetas 1, 2, 5, 6, 10 y 13. Fabricadas con Asfalto modificado.



Como se puede observar, la deformación total de las probetas elaboradas con los 3 distintos contenidos asfálticos y comparadas con su réplica es relativamente la misma. A excepción de las que contienen el 6% de asfalto.

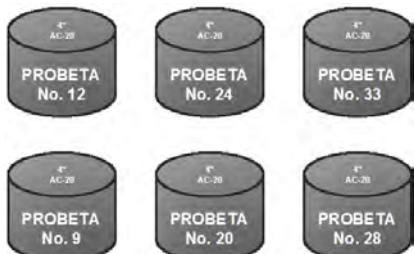
Para el análisis de resultados no se descartará ningún ensayo y se realizarán las gráficas de las deformaciones promedio de las probetas fabricadas con el mismo porcentaje asfáltico.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ENSAYO 5

Se colocaron las probetas de 4” elaboradas con Asfalto AC-20 de Salamanca, éste ensayo se realizó en inmersión a los 10,000 ciclos y su acomodo fue el siguiente:



- La probeta 9 y 12 corresponden al 6% de Asfalto.
- La probeta 20 y 24 corresponden al 7% de Asfalto.
- La probeta 28 y 33 corresponden al 8% de Asfalto.

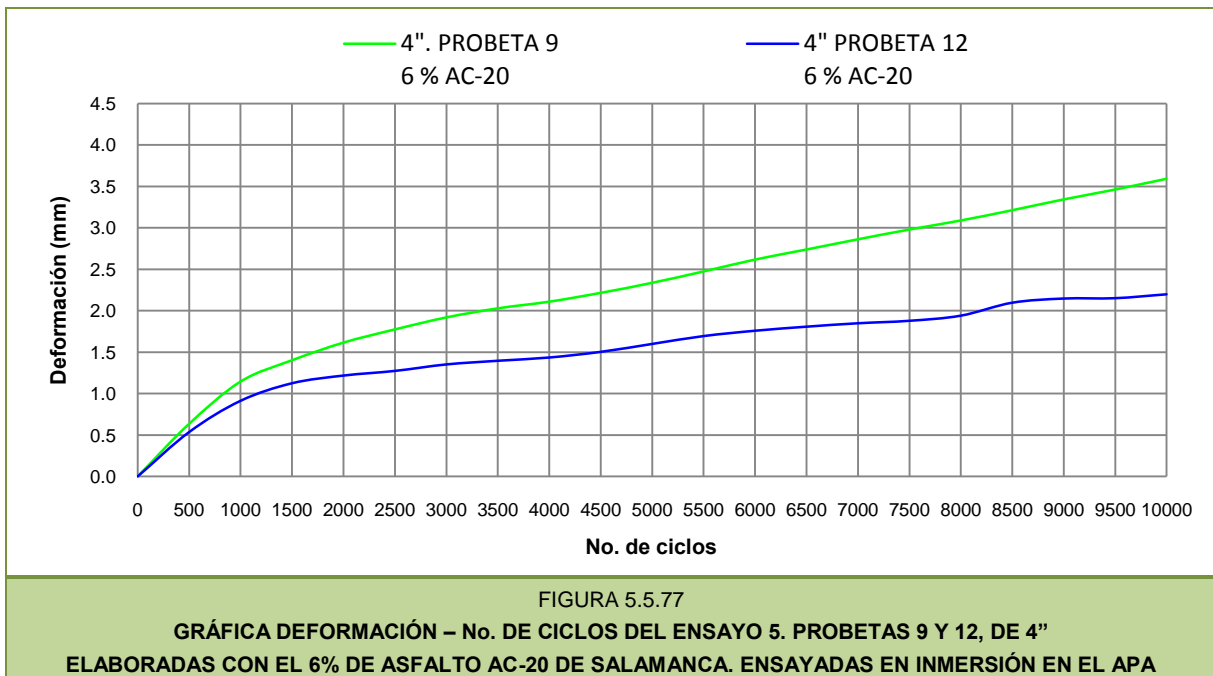
En la Tabla 5.5.27 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 9 y 12. En la Figura 5.5.76 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.77 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 9		PROBETA 12	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.63	500	0.54
1000	1.15	1000	0.91
1500	1.40	1500	1.13
2000	1.62	2000	1.22
2500	1.77	2500	1.27
3000	1.92	3000	1.35
3500	2.03	3500	1.40
4000	2.11	4000	1.44
4500	2.22	4500	1.50
5000	2.34	5000	1.60
5500	2.47	5500	1.70
6000	2.62	6000	1.76
6500	2.74	6500	1.81
7000	2.86	7000	1.85
7500	2.98	7500	1.88
8000	3.09	8000	1.94
8500	3.21	8500	2.10
9000	3.34	9000	2.15
9500	3.46	9500	2.15
10000	3.59	10000	2.20

TABLA 5.5.27
**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 5, PROBETAS 9 Y 12 DE 4”
ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

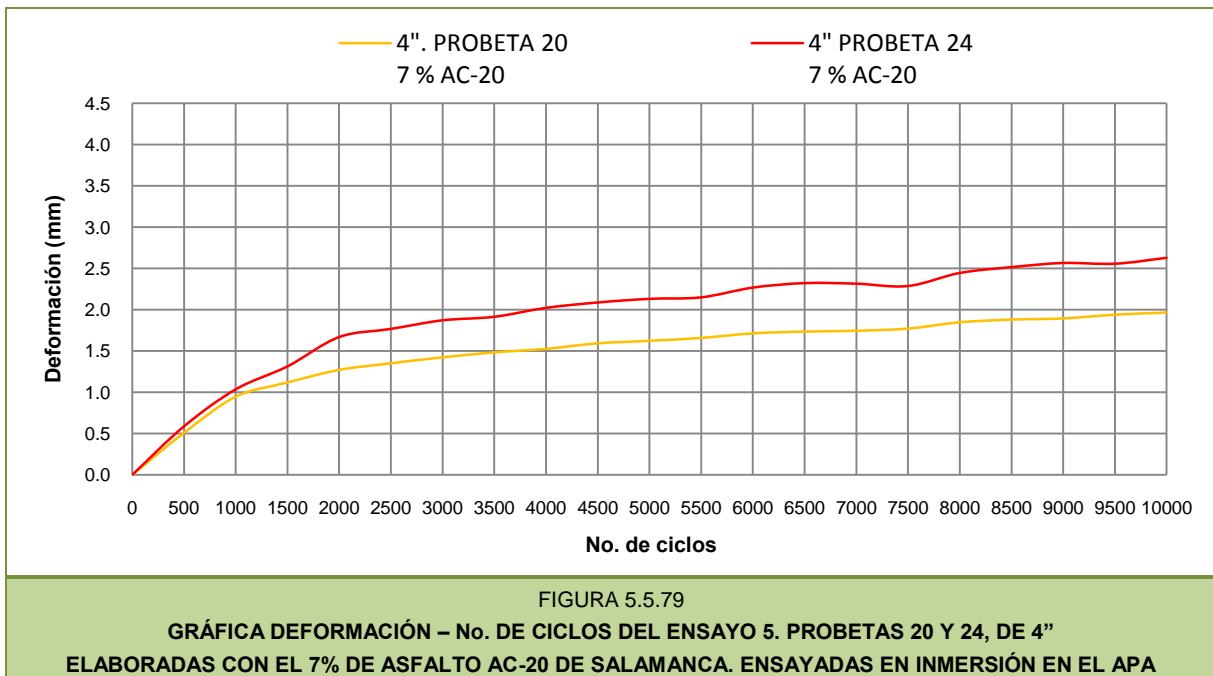
En la Tabla 5.5.28 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 17 y 22. En la Figura 5.5.78 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.79 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 20		PROBETA 24	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.51	500	0.59
1000	0.95	1000	1.03
1500	1.12	1500	1.31
2000	1.27	2000	1.67
2500	1.35	2500	1.77
3000	1.42	3000	1.87
3500	1.48	3500	1.91
4000	1.53	4000	2.02
4500	1.59	4500	2.09
5000	1.62	5000	2.13
5500	1.66	5500	2.15
6000	1.71	6000	2.27
6500	1.74	6500	2.32
7000	1.75	7000	2.31
7500	1.77	7500	2.29
8000	1.85	8000	2.44
8500	1.88	8500	2.51
9000	1.90	9000	2.57
9500	1.94	9500	2.56
10000	1.97	10000	2.63

TABLA 5.5.28
RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 5, PROBETAS 20 Y 24 DE 4"
ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

En la Tabla 5.5.29 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 28 y 33. En la Figura 5.5.80 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.81 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

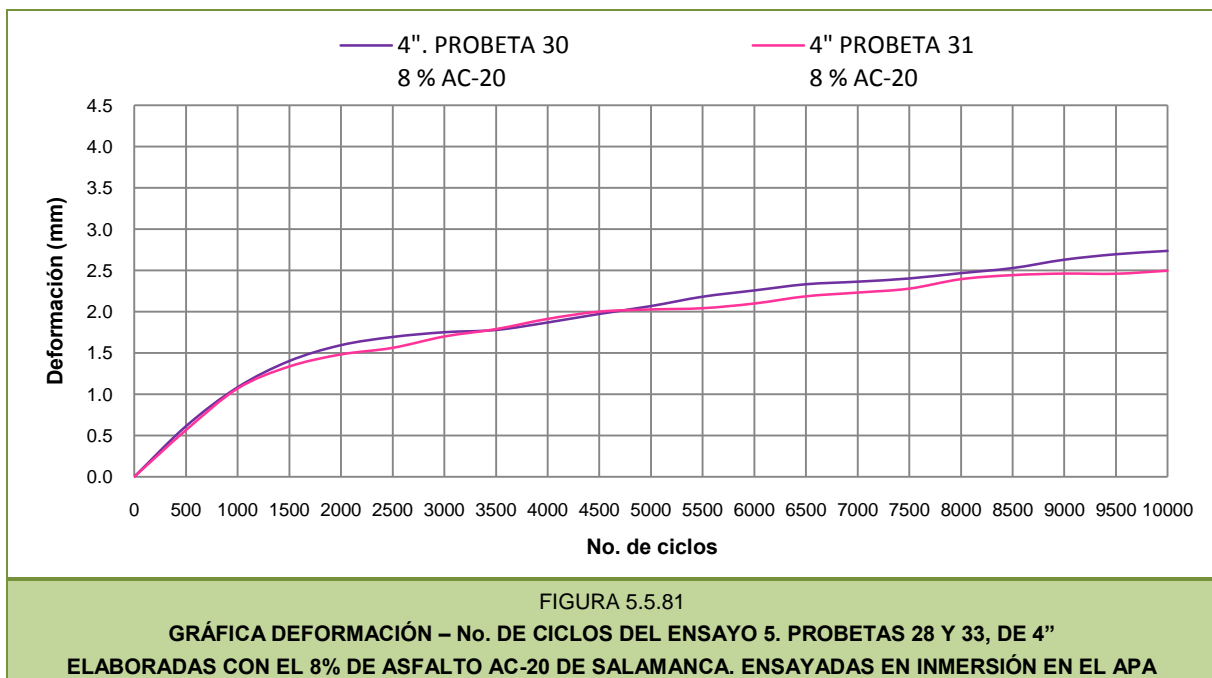
PROBETA 28		PROBETA 33	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.61	500	0.56
1000	1.08	1000	1.07
1500	1.40	1500	1.34
2000	1.59	2000	1.48
2500	1.69	2500	1.56
3000	1.75	3000	1.70
3500	1.78	3500	1.79
4000	1.87	4000	1.91
4500	1.97	4500	2.00
5000	2.07	5000	2.03
5500	2.18	5500	2.04
6000	2.26	6000	2.10
6500	2.33	6500	2.19
7000	2.36	7000	2.23
7500	2.40	7500	2.28
8000	2.47	8000	2.39
8500	2.53	8500	2.44
9000	2.63	9000	2.46
9500	2.70	9500	2.46
10000	2.74	10000	2.50

TABLA 5.5.29

**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 5, PROBETAS 28 Y 33 DE 4”
ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC -20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.82 se pueden observar todas las gráficas de Deformación – No. de ciclos de los ensayos realizados en inmersión con las probetas de 4", elaboradas con Ac – 20 de Salamanca.

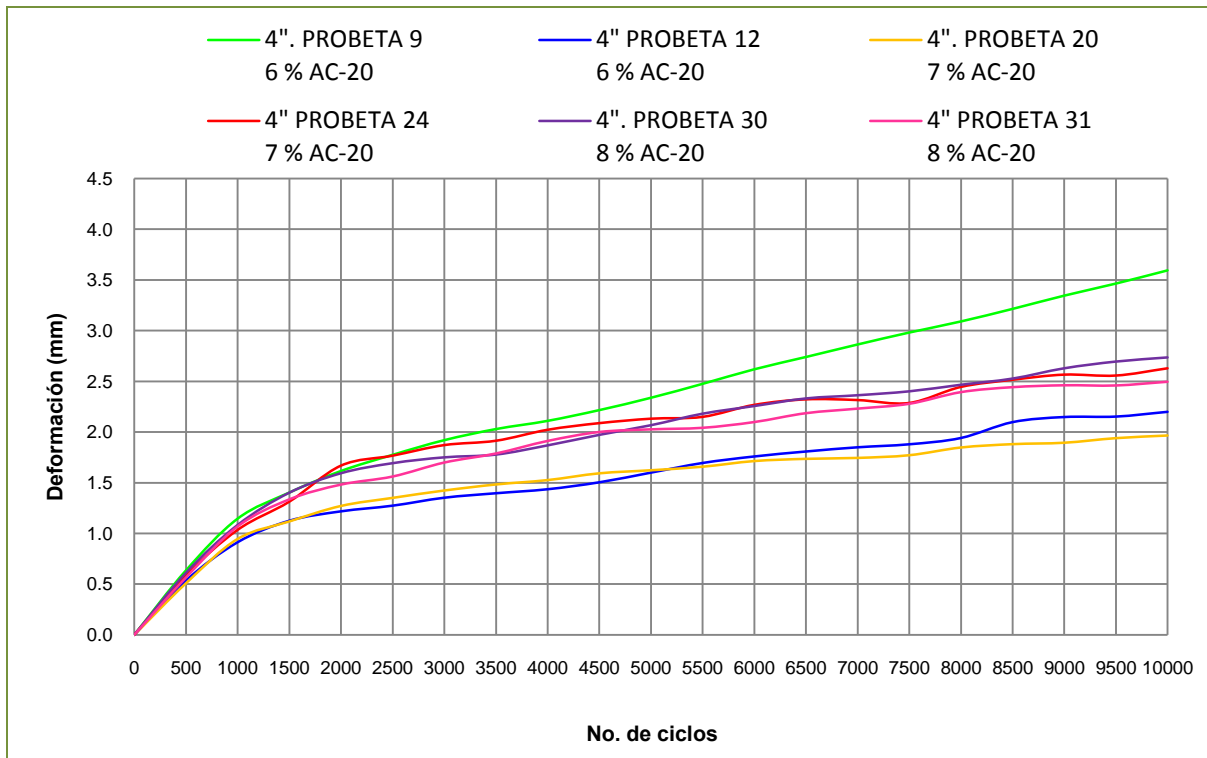


FIGURA 5.5.82
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 5. PROBETAS
9, 12, 20, 24, 28, Y 33, DE 4" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8%
DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA

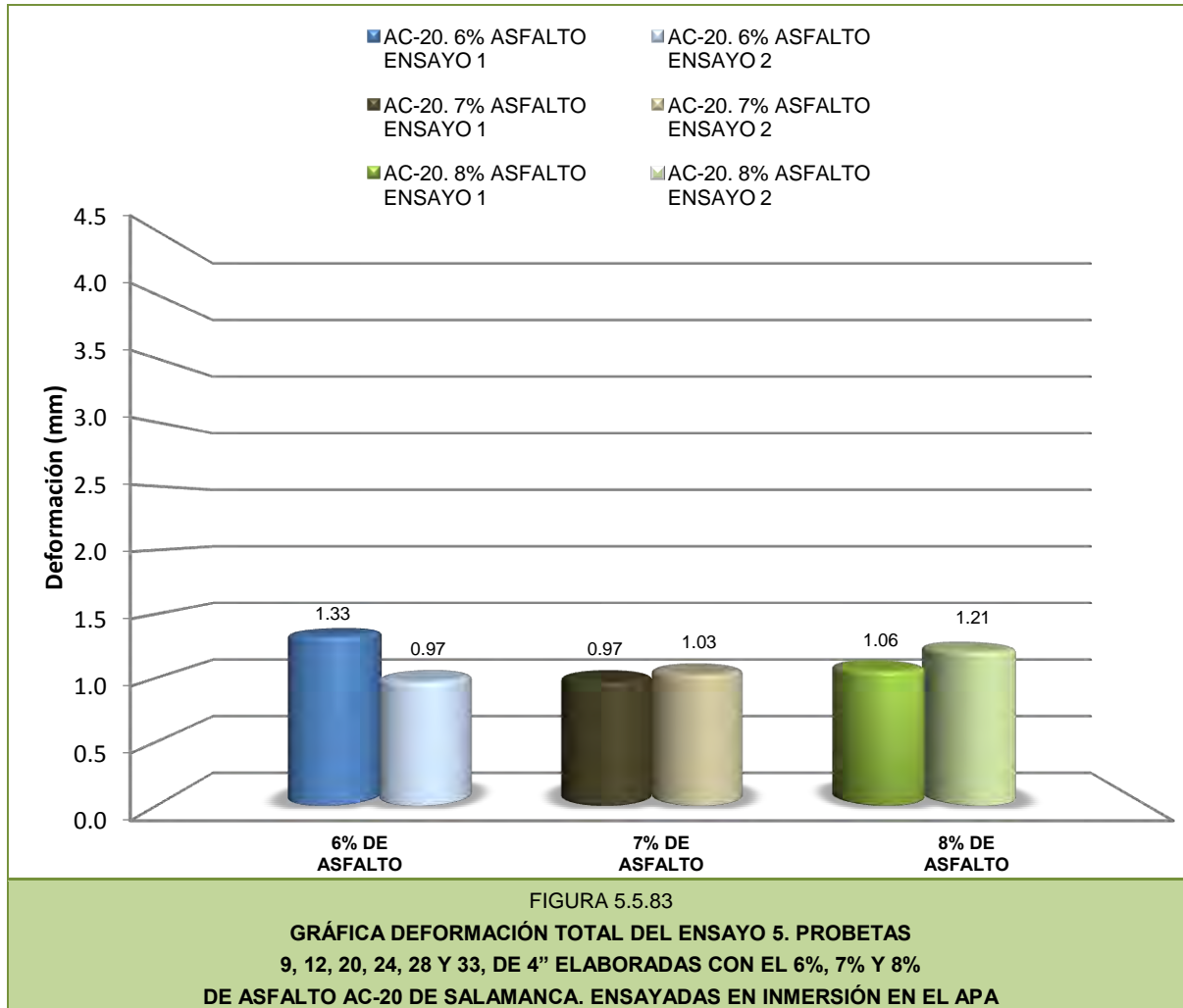
Como se puede observar la probeta 9 se deforma mucho más que la 12. La probeta 24 se deforma más que la 20. Prácticamente el comportamiento de las probetas 28 y 33 es similar. Estas comparaciones están realizadas con las probetas que tienen el mismo contenido asfáltico.

Se debe recordar que estos datos son el resultado del promedio obtenido a cada 500 ciclos, por lo que al analizar la gráfica de la deformación total obtenida para cada ensayo se determinará si se descartará alguno de estos para la realización del análisis de resultados.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.83 se puede observar la deformación total obtenida en el ensayo 5 en inmersión, de las Probetas 9, 12, 20, 24, 28 y 33. Fabricadas con AC – 20 de Salamanca.



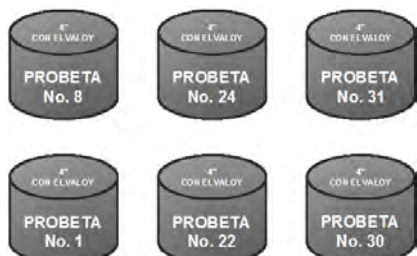
Como se puede observar, la deformación total de las probetas elaboradas con los 3 distintos contenidos asfálticos y comparadas con su réplica es muy similar.

Para el análisis de resultados no se descartará ningún ensayo y se realizarán las gráficas de las deformaciones promedio de las probetas fabricadas con el mismo porcentaje asfáltico.



ENSAYO 6

Se colocaron las probetas de 4" elaboradas con Asfalto modificado, éste ensayo se realizó en inmersión y su acomodo fue:



- La probeta 1 y 8 corresponden al 6% de Asfalto.
- La probeta 22 y 24 corresponden al 7% de Asfalto.
- La probeta 30 y 31 corresponden al 8% de Asfalto.

En la Tabla 5.5.30 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 1 y 8. En la Figura 5.5.84 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.85 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

PROBETA 1		PROBETA 8	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.26	500	0.28
1000	0.37	1000	0.38
1500	0.39	1500	0.41
2000	0.42	2000	0.38
2500	0.42	2500	0.39
3000	0.34	3000	0.42
3500	0.36	3500	0.36
4000	0.35	4000	0.33
4500	0.32	4500	0.37
5000	0.31	5000	0.35
5500	0.31	5500	0.37
6000	0.33	6000	0.34
6500	0.32	6500	0.35
7000	0.32	7000	0.34
7500	0.33	7500	0.34
8000	0.35	8000	0.35
8500	0.36	8500	0.36
9000	0.37	9000	0.36
9500	0.39	9500	0.36
10000	0.41	10000	0.38

TABLA 5.5.30
RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 6, PROBETAS 1 Y 8 DE 4" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

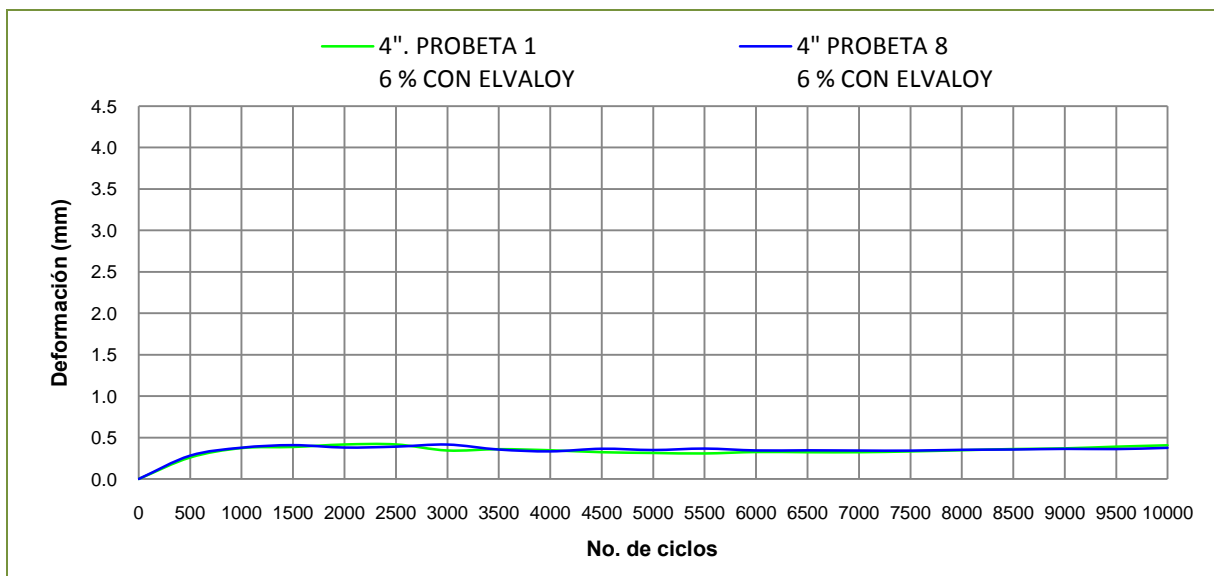


FIGURA 5.5.85
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 6. PROBETAS 1 Y 8, DE 4"
ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS INMERSIÓN EN EL APA



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

En la Tabla 5.5.31 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 22 y 24. En la Figura 5.5.86 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.87 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

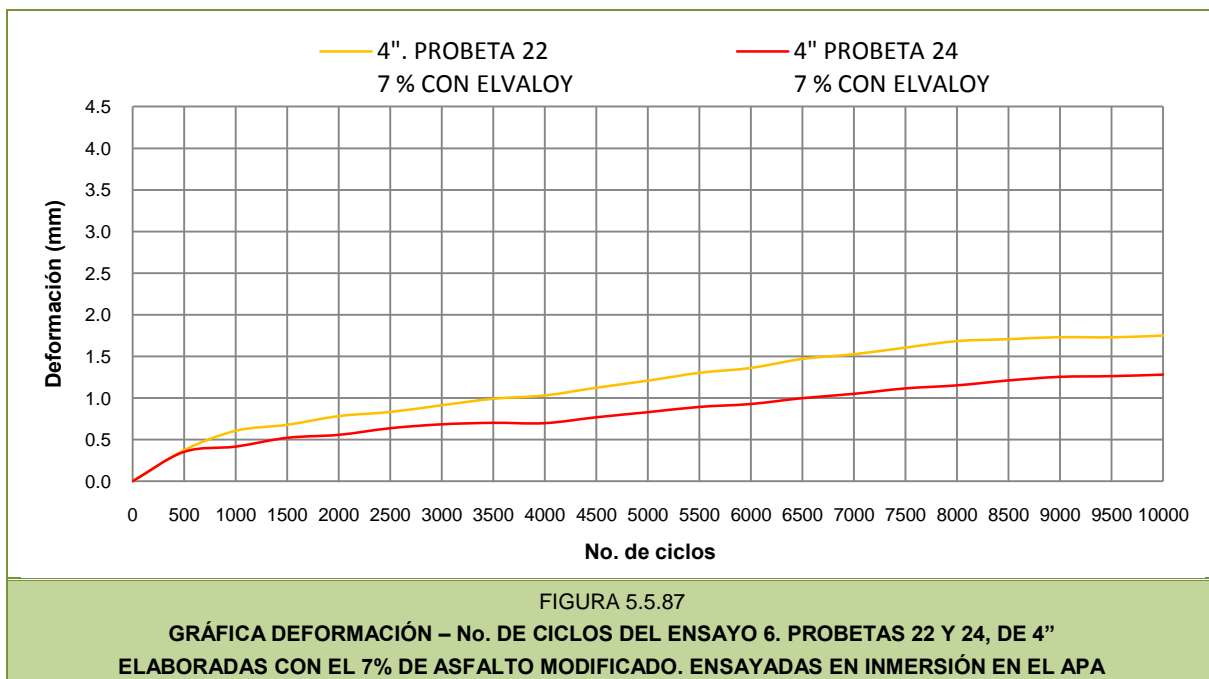
PROBETA 22		PROBETA 24	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.37	500	0.35
1000	0.61	1000	0.42
1500	0.68	1500	0.52
2000	0.78	2000	0.56
2500	0.83	2500	0.64
3000	0.91	3000	0.68
3500	0.99	3500	0.70
4000	1.03	4000	0.70
4500	1.12	4500	0.77
5000	1.21	5000	0.83
5500	1.30	5500	0.89
6000	1.36	6000	0.93
6500	1.47	6500	1.00
7000	1.53	7000	1.05
7500	1.61	7500	1.12
8000	1.68	8000	1.15
8500	1.71	8500	1.21
9000	1.73	9000	1.25
9500	1.73	9500	1.26
10000	1.75	10000	1.28

TABLA 5.5.31

**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 6, PROBETAS 22 Y 24 DE 4"
ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

En la Tabla 5.5.32 se pueden observar los resultados del ensayo de las probetas 4 y 10. En la Figura 5.5.61 se pueden observar las probetas después de ser ensayadas y en la Figura 5.5.62 se muestra la evolución de la deformación a cada 500 ciclos.

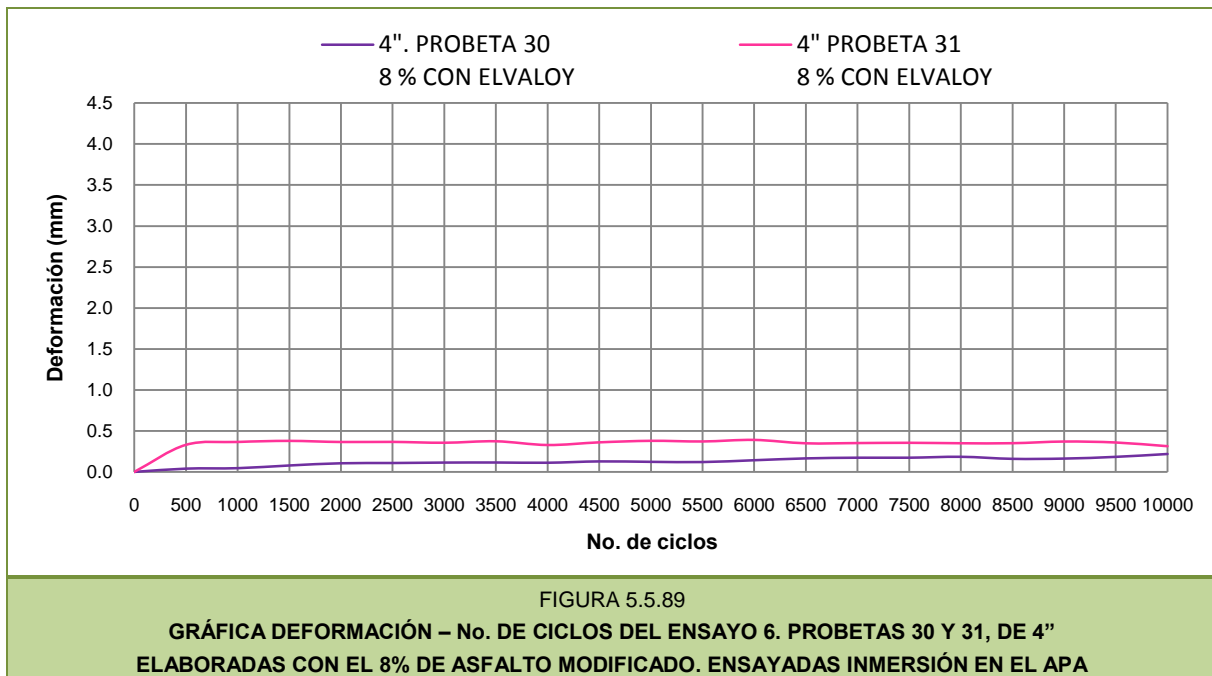
PROBETA 30		PROBETA 31	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.04	500	0.33
1000	0.05	1000	0.37
1500	0.08	1500	0.38
2000	0.11	2000	0.37
2500	0.11	2500	0.37
3000	0.11	3000	0.36
3500	0.11	3500	0.38
4000	0.11	4000	0.33
4500	0.13	4500	0.36
5000	0.12	5000	0.38
5500	0.12	5500	0.37
6000	0.14	6000	0.39
6500	0.16	6500	0.35
7000	0.17	7000	0.35
7500	0.17	7500	0.36
8000	0.18	8000	0.35
8500	0.16	8500	0.35
9000	0.16	9000	0.37
9500	0.18	9500	0.36
10000	0.22	10000	0.31

TABLA 5.5.32

**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 6, PROBETAS 30 Y 31 DE 4”
ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*





Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.90 se pueden observar todas las gráficas de Deformación – No. de ciclos de los ensayos realizados en inmersión con las probetas de 4", elaboradas con Asfalto modificado.

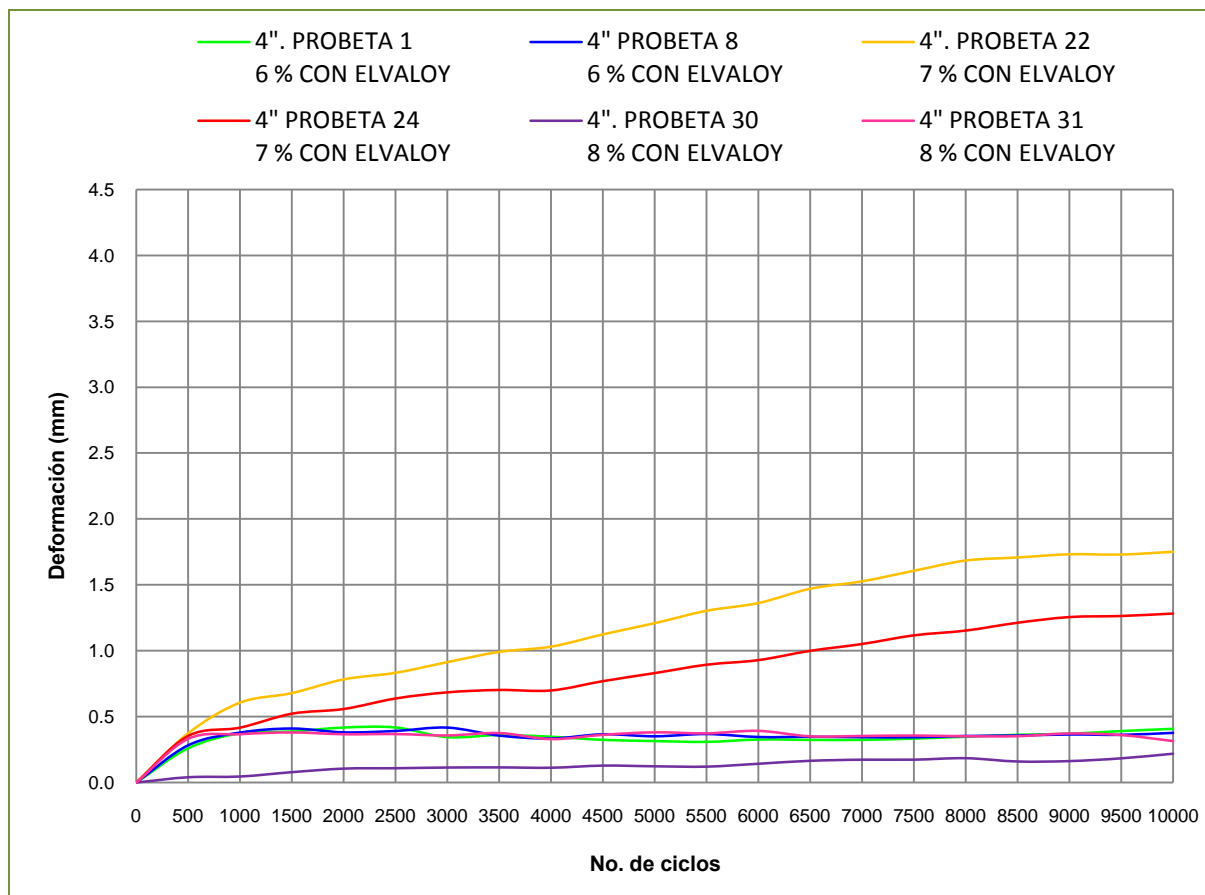


FIGURA 5.5.90

GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 6. PROBETAS 1, 8, 22, 24, 30 y 31 DE 4"
ELABORADAS CON ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA

Como se puede observar, las probetas 1 y 8 se deforman de la misma manera. Las probeta 22 se deforma más que la 24. Las probeta 31 se deforma más que la 24. Estas comparaciones están realizadas con las probetas que tienen el mismo contenido asfáltico.

Se debe recordar que estos datos son el resultado del promedio obtenido a cada 500 ciclos, por lo que al analizar la gráfica de la deformación total obtenida para cada ensayo se determinará si se descartará alguno de estos para la realización del análisis de resultados.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.91 se puede observar la deformación total obtenida en el ensayo 6 en inmersión, de las Probetas 1, 8, 22, 24, 30 y 31. Ensayadas en inmersión, fabricadas con Asfalto modificado.

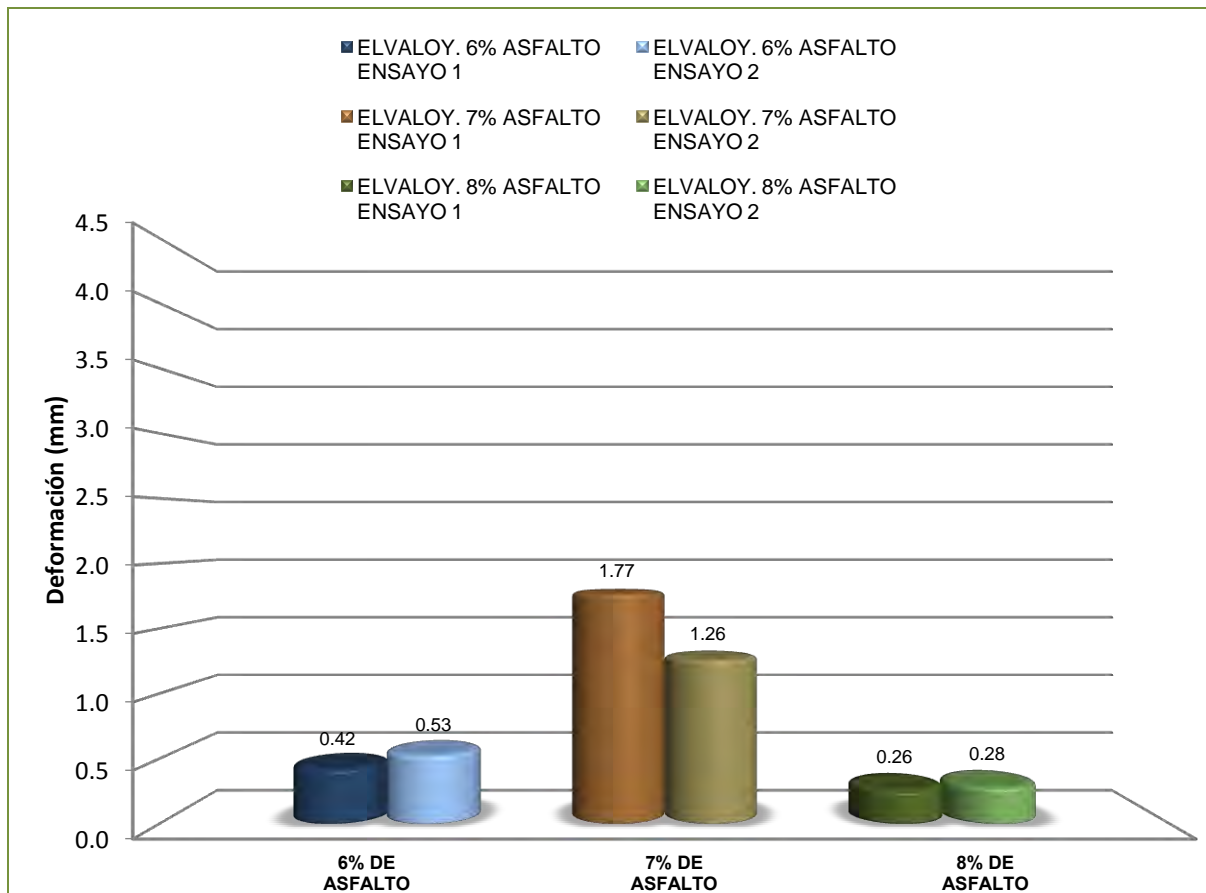


FIGURA 5.5.91

GRÁFICA DEFORMACIÓN TOTAL DEL ENSAYO 6. PROBETAS 1, 8, 22, 24, 30 Y 31, DE 4" ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN INMERSIÓN EN EL APA

Como se puede observar, la deformación total de las probetas elaboras con los 3 distintos contenidos asfálticos y comparadas con su réplica es muy similar.

Para el análisis de resultados no se descartará ningún ensayo y se realizarán las gráficas de las deformaciones promedio de las probetas fabricadas con el mismo porcentaje asfáltico.



5.5.4 ENSAYOS REALIZADOS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

Con el fin de analizar la susceptibilidad de la mezclas asfáltica a la deformación permanente con la presencia de agua, se decidió realizar ensayo en la Rueda Cargada de Hamburgo.

CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

A continuación se mencionan algunas características del método estándar de la prueba denominada AASHTO T 324-04 “Método de Prueba Estándar para la prueba de Rueda Cargada de Hamburgo para Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA)”.

- El método consiste en la realización de la prueba a la susceptibilidad de roderas y la humedad de mezclas asfálticas.
- Este método se utiliza para determinar la falla prematura debido a la debilidad de la Mezcla asfáltica en la estructura, la falta de rigidez de las carpetas y el daño por humedad. Se mide la profundidad de la rodera y el número de pasadas hasta la falla.
- El equipo consiste en una máquina eléctrica con un movimiento de 203.2 mm (8”) con un diámetro de 47 mm (1.85”). La carga de la rueda es de 705 ± 4.5 N ($158 \text{ lb} \pm 1$ lb). Se realizan aproximadamente 50 pasadas por minuto. La velocidad máxima de la rueda debe ser de 0.305 m/s (1 ft/seg).
- El agua circulará en el equipo, de manera que se mantenga a una temperatura estable. La temperatura del agua estará en un rango de 25 a 70 °C (77 a 158° F), con una precisión de ± 1 °C (1.8° F).
- La profundidad de la rodera es medida mediante un LVDT, la cual es tomada en el centro de la probeta y es medida por lo menos cada 400 pasadas.
- Las muestras se colocan en moldes de acero inoxidable, las cuales son montadas firmemente en el equipo. Las probetas se encuentran suspendidas, lo cual permite la libre circulación del agua por todos los lados.
- Los especímenes de ensayo pueden ser losas o cilindros. Para la compactación de las muestras cilíndricas se debe utilizar el compactador giratorio Superpave, para las losas de 320 mm (12.5”) de largo, 260 mm (10.25”) de ancho y un espesor de 38 mm (1.5”) a 100 mm (4”) se debe utilizar un compactador lineal.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

- La probeta deberá quedar al nivel de la superficie del molde, de ser necesario se colocará yeso para alcanzar dicha altura.
- Se recomienda que las probetas fabricadas en laboratorio cuenten con un porcentaje de vacíos del $7 \pm 2\%$.
- Para el montaje de las probetas en los moldes se utiliza yeso, en proporción yeso-agua de 1:1. El yeso se debe colocar en todos los espacios huecos del molde, si se llegara a utilizar otro material de fijación este debe ser capaz de soportar una carga de 890 N (200 libras) sin romperse.
- La prueba se parará cuando se hayan realizado 20,000 pasadas o si el desplazamiento del LVDT es de 40.9 mm (1.6").
- El informe de la prueba debe incluir:
 - La producción de HMA (campo o laboratorio)
 - Método de compactación (tabla o espécimen en SGC)
 - Número máximo de pasadas
 - Temperatura de la prueba
 - Contenido de vacíos de la probeta
 - Tipo y contenido de aditivos utilizados
 - Fluencia de la pendiente
 - Zona de la pendiente
 - Punto de inflexión.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO

A continuación se describirá el procedimiento de los ensayos realizados en la empresa Surfax S.A. de C.V.

Inicialmente se encendió el equipo y se programó el ensayo con los siguientes parámetros:

- Temperatura: 60° C
- No. de ciclos: 20,000
- Lectura inicial en el ciclo: 22
- Deformación máxima: 45 mm



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

Lo que el programa de adquisición de datos reconoce como ciclos, en realidad son pasadas, por consiguiente las probetas fueron programadas para un total de 20,000 pasadas. En la figura 5.5.92 se pueden observar la pantalla del sistema de adquisición de datos donde se programó cada ensayo y en la figura 5.5.93 se ilustra la gráfica de deformación – número de ciclos que va registrando el programa en el transcurso del ensayo.

Una vez que se programó el ensayo, el contenedor se empezó a llenar de agua y se esperó a que alcanzara la temperatura a la que se llevaría a cabo la prueba.

Posteriormente se forraron las probetas con papel aluminio para evitar que se ensuciaran de yeso. Se colocó una capa de arena en el molde, logrando con ello que la probeta quedara perfectamente nivelada. Se centró la probeta en el molde y se llenó hasta la mitad con arena, para posteriormente terminar de llenarlo con una mezcla de yeso. Esto nos permite que todo el sistema sea utilizado y tener una presión de confinamiento, antes de iniciar la prueba se dejó fraguar el yeso durante 2 hrs.

Se introdujeron las probetas en la máquina, sumergiéndose en el agua a la temperatura de ensayo, se colocaron las redas metálicas sobre los especímenes y se esperó a que nuevamente se homogenizara la temperatura del agua para posteriormente iniciar el ensayo.

Se corrió el ensayo y se esperó a que se cumpliera alguna de las 2 condiciones programadas (número total de ciclos o deformación máxima), una vez terminada la prueba y se drenó el agua para poder sacar las probetas.

Finalmente se desmontaron las probetas y se limpió perfectamente el equipo para posteriormente poder realizar otro ensayo.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

Datos del Cliente | **Parámetros de la prueba** | Desarrollo de la prueba

Ingresar parámetros de la prueba

Temperatura (°C): 60

No de Ciclos: 20000

Offset inicial en ciclo: 22

Máxima deformación: 45

Acciones:

Enviar Datos

Reset

15

Empezar automáticamente

Enfriar

Temperatura

Probe 1

Probe 2

Anterior

FIGURA 5.5.92
PARÁMETROS ESTABLECIDOS PARA LOS ENSAYOS REALIZADOS
EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

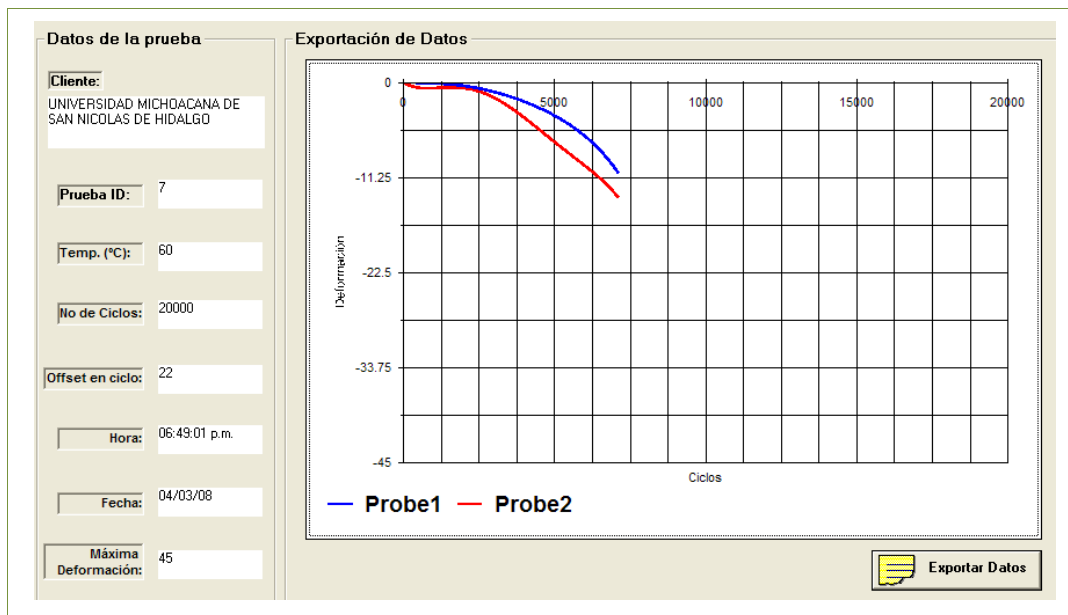


FIGURA 5.5.93
GRÁFICA DE DEFORMACIÓN – NÚMERO DE CICLOS QUE SE REGISTRA DURANTE
LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la figura 5.5.94 se ilustra el procedimiento realizado en la Rueda Cargada de Hamburgo.

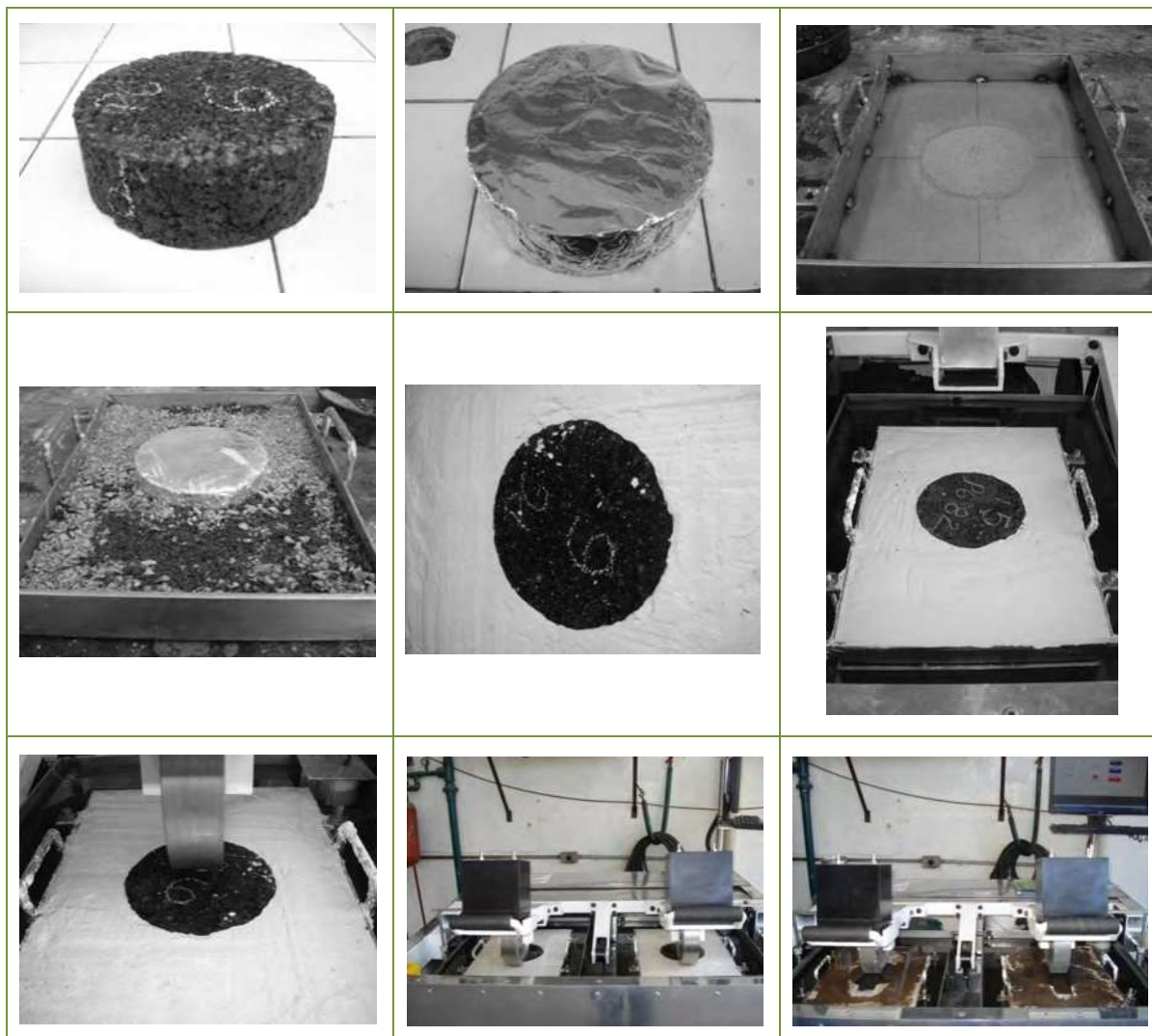


FIGURA 5.5.94

PROCEDIMIENTO EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD" DE SURFAX S.A. DE C.V.

Durante los ensayos se pudo observar que aunque el ensayo es muy agresivo, lo sucedido en las probetas es un claro reflejo de lo que sucede en los caminos, ya que cuando existe poca afinidad entre el material asfáltico y los pétreos, se empiezan a disgregar los pétreos de la mezcla.



RESULTADOS OBTENIDOS

Estos ensayos fueron realizados en las empresas Surfax S.A. de C.V. de Guadalajara, Jalisco y Sem Materials México de Puebla, Puebla. Debido a que los ensayos de éste trabajo fueron los primeros que se realizaron en el equipo de la empresa Surfax S.A. de C.V., se presentaron varios problemas y en ninguno de los casos se logró terminar por completo la prueba; a pesar de que en la empresa Sem Materials México ya se han realizado ensayos con este equipo, también se presentaron problemas en la ejecución de las pruebas.

A continuación se mostrarán los resultados que se obtuvieron en cada uno de los ensayos, para lo cual se promediaron los datos a cada 500 ciclos. Para la realización del análisis de resultados en el Capítulo 6 se descartarán algunos ensayos por no haberse obtenido resultados confiables.

ENSAYO 1

PROBETAS 2 Y 3 CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA

Este ensayo se realizó en la empresa Surfax S.A. de C.V, durante el ensayo se observó que el software no registraba adecuadamente el número de ciclos, además de que no mostró la verdadera deformación de la probeta 2, pues después de 2 hrs en teoría solo se había deformado 1 mm, cuando en la realidad esta probeta se había deformado más de lo doble de la probeta 3.

El ensayo se paró después de 2 hrs. con 40 min. debido a que la probeta 2 estaba muy deformada y como es necesario correr el ensayo por pares, ya no pudo continuarse con las lecturas de la probeta No.3

Como parte del agua se va evaporando y la probeta 3 no se encontraba completamente sumergida, se cree que esto pudo influir para que ésta probeta se deformara menos. En la Figura 5.5.95 se puede observar claramente como la probeta 2 estaba completamente sumergida y la probeta 3 no, con lo cual se puede corroborar como la importancia del agua y la temperatura de ésta en la resistencia a las deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

PROBETA 2		PROBETA 3	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	-0.74	500	0.63
1000	-1.05	1000	1.48
1500	-0.52	1500	1.96
2000	-0.01	2000	2.27
2500	0.11	2500	2.57
3000	-0.19	3000	2.94
3500	-0.71	3500	3.43
4000	-1.06	4000	4.03
4500	-0.85	4500	4.70
5000	0.32	5000	5.40
5500	2.64	5500	6.07
6000	6.10	6000	6.64
6500	10.29	6500	7.09
7000	14.39	7000	7.38
7500	17.00	7500	7.53
8000	16.09	8000	7.62
8168	12.48	8168	7.68

TABLA 5.5.33

**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 1.
PROBETAS 2 Y 3 DE 6" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA.
ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX S.A. DE C.V.**

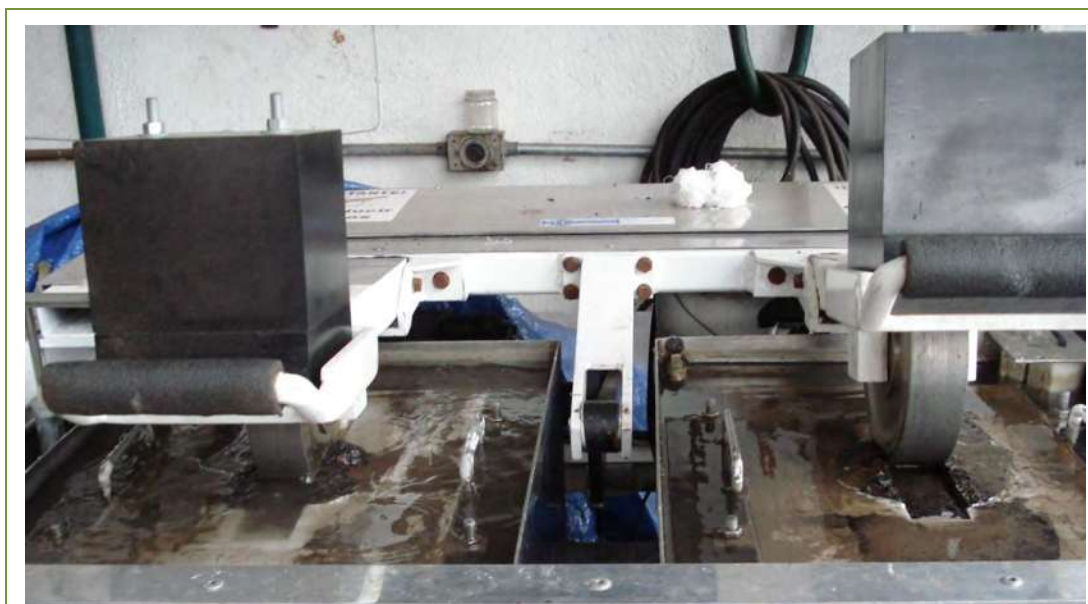


FIGURA 5.5.95

**ENSAYO 1, PROBETAS 1 Y 2. DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA.
ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SURFAX S.A. DE C.V"**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

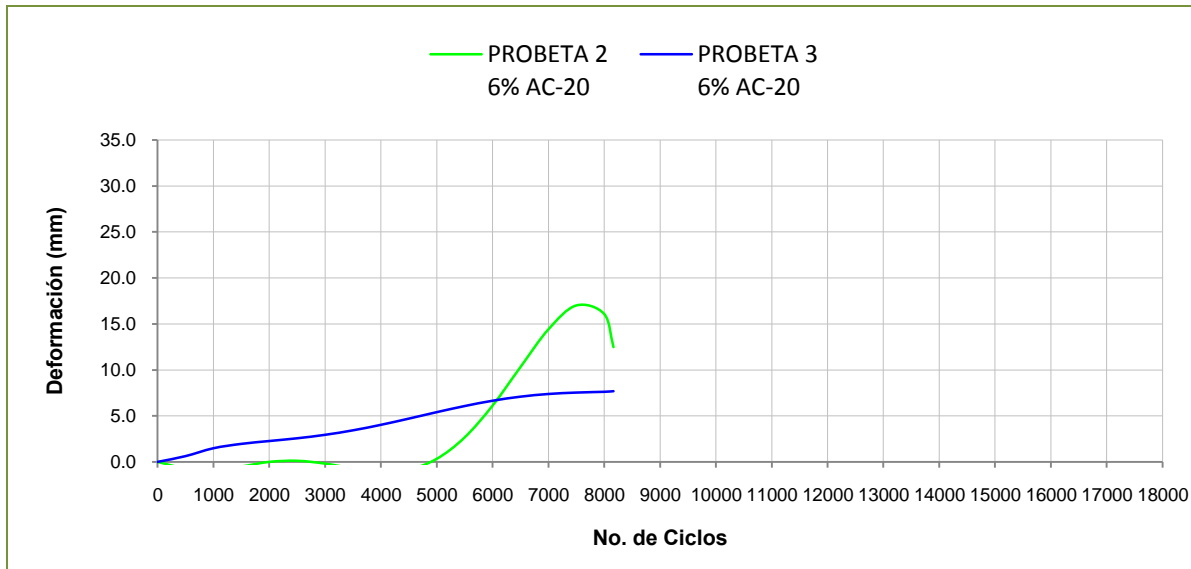


FIGURA 5.5.96

**GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 1. PROBETAS 2 Y 3, DE 6".
ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS
EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SURFAX S.A. DE C.V"**

Como se puede observar en la Figura 5.5.96 la curva de la probeta No.2 tuvo un comportamiento extraño, por lo que para el análisis de resultados en el Capítulo 6 se descartará dicho ensayo.



ENSAYO 2

PROBETAS 1 Y 2 CON ASFALTO MODIFICADO

Este ensayo se realizó en la empresa Sem Materials México, para la realización de este ensayo se tuvieron muchos problemas ya que el yeso que se iba a utilizar inicialmente era de muy mala calidad y aunque se dejó fraguar el molde durante 24 hrs, nunca lo hizo. Por lo que se descimbraron las probetas para posteriormente cimbrarlas con un yeso de mejor calidad.

Después de algunos ciclos de iniciada la prueba, el yeso de la Probeta 1 empezó a ceder y posteriormente ocurrió lo mismo con la Probeta 2, se creó que esto se debe a que el cimbrado de las probetas se realizó en partes lo que ocasionó que posteriormente éste se fracturara.

Debido al problema que se presentó con el yeso, las placas metálicas que se ubicaban debajo de las probetas empezaron a moverse.

También se observó que las pastillas se deformaron de forma cóncava, esto se debió a que el confinamiento de la probeta no fue el adecuado y aunque la probeta resistía el paso de la rueda metálica las orillas se empezaron a disgregar.

PROBETA 1		PROBETA 2	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.54	500	0.13
1000	1.30	1000	0.90
1500	1.70	1500	1.32
2000	2.05	2000	2.11
2500	2.46	2500	3.23
3000	2.87	3000	4.79
3500	3.42	3500	5.77
4000	4.55	4000	7.28
4500	5.91	4500	9.25
5000	8.05	5000	11.76
5500	10.38	5500	19.45
6000	13.73	6000	31.27

TABLA 5.5.34

**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 2.
PROBETAS 1 Y 2 DE 6" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO, MODIFICADO.
ENSAYADAS EN LA RUEDAD CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SEM MATERIALS MÉXICO".**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.97

ENSAYO 2, PROBETAS 1 Y 2. DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO.
ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SEM MATERIALS MÉXICO"

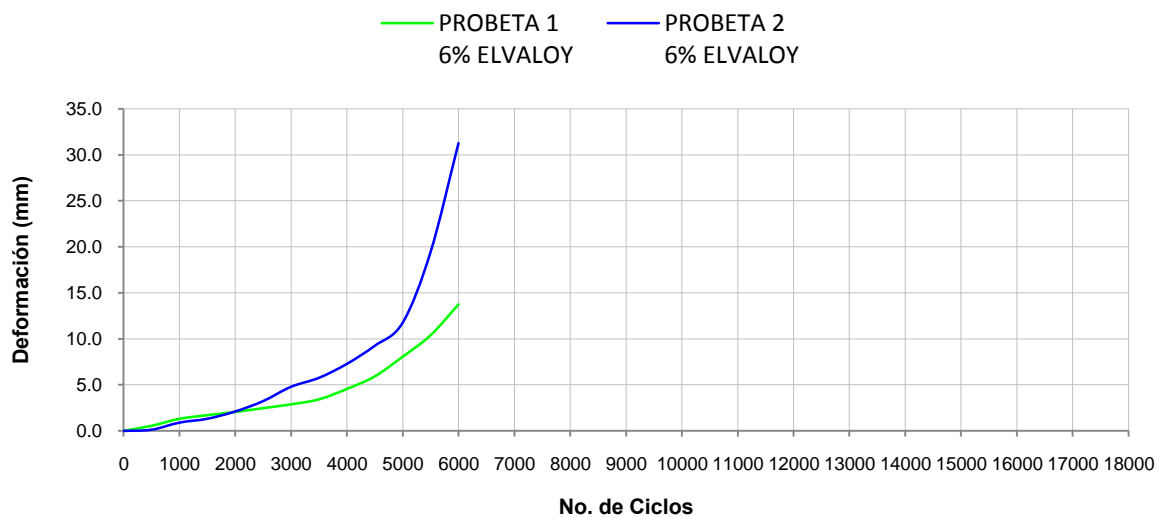


FIGURA 5.5.98

GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 2. PROBETAS 1 Y 2, DE 6". ELABORADAS
CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"

En la Figura 5.5.98 se puede observar que ambas curvas presentan la misma tendencia, sin embargo, después de los 5000 ciclos la curva de la probeta 2 presenta un salto, esto se debió a que las lecturas que empezó a tomar el LVDT era la de la profundidad del yeso y no la de la probeta. Debido a que las lecturas obtenidas no son del todo confiables, en las gráficas de deformación total se utilizarán los resultados hasta los 5000 ciclos.



ENSAYO 3

PROBETAS 6 Y 8 CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA

Este ensayo se realizó en la empresa Surfax S.A. de C.V., durante la realización del ensayo hubo un problema en la ejecución del programa, se presentaron muchas oscilaciones en las lecturas, por lo cual se decidió parar la prueba a los 4778 ciclos, ya que hubo un brinco en la deformación y la probeta No. 2 presentó una gran deformación, aunque en la Figura 5.5.100 se puede observar en las gráfica Deformación – No de ciclos ambas curvas presentan la misma tendencia.

Debido a que estas pruebas fueron de las primeras que se realizaron en el equipo de Surfax S.A. DE C.V., las pruebas fueron monitoreadas constantemente por los fabricantes del equipo, es por ello que esta prueba se finalizó antes.

PROBETA 6		PROBETA 8	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	1.27	500	1.84
1000	2.42	1000	2.74
1500	3.40	1500	3.44
2000	4.71	2000	4.29
2500	6.21	2500	5.33
3000	7.57	3000	6.35
3500	11.27	3500	8.23
4000	8.59	4000	7.47
4500	13.42	4500	11.05
4778	15.60	4778	13.00

TABLA 5.5.35

**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 3.
PROBETAS 6 Y 8 DE 6" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA.
ENSAYADAS EN LA RUEDAD CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX S.A. DE C.V.**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

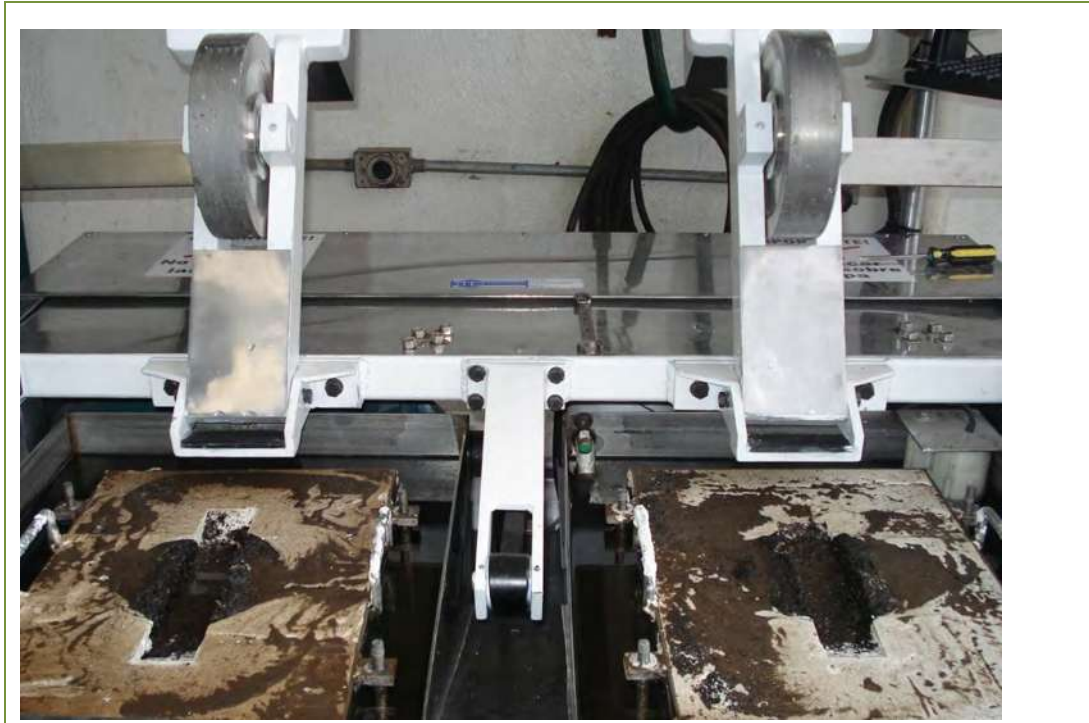


FIGURA 5.5.99
ENSAYO 3, PROBETAS 6 Y 8. DE 6". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTM". "SURFAX S.A. DE C.V"

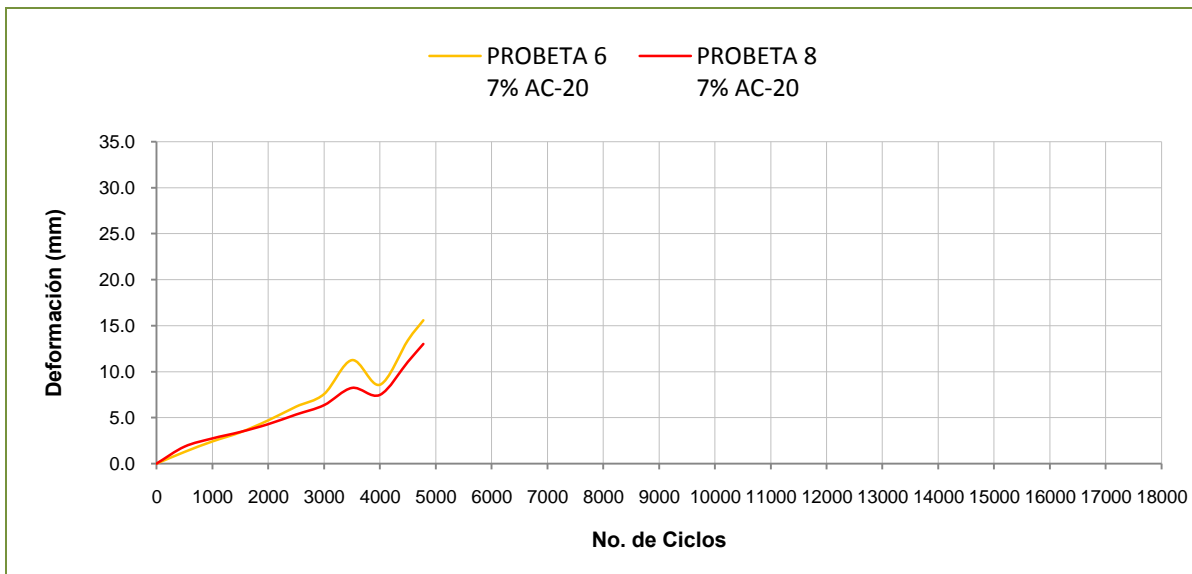


FIGURA 5.5.100
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 3. PROBETAS 6 Y 8, DE 6". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTM"



ENSAYO 4

PROBETAS 5 Y 6 CON ASFALTO MODIFICADO

Este ensayo se realizó en la empresa Surfax S.A. de C.V., durante los primeros 3,000 ciclos del ensayo las probetas prácticamente no se habían deformado, posteriormente se empezaron a deformar rápidamente y se observó que la deformación real era mayor que la deformación medida por los LVDT's.

PROBETA 1		PROBETA 2	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.03	500	0.40
1000	0.09	1000	0.71
1500	0.17	1500	0.67
2000	0.32	2000	0.64
2500	0.57	2500	0.86
3000	0.93	3000	1.43
3500	1.40	3500	2.33
4000	1.97	4000	3.52
4500	2.66	4500	4.88
5000	3.48	5000	6.32
5500	4.46	5500	7.75
6000	5.65	6000	9.15
6500	7.13	6500	10.57
7000	9.02	7000	12.18
7084	10.34	7084	13.30

TABLA 5.5.36
**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 4.
PROBETAS 1 Y 2 DE 6" ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO.
ENSAYADAS EN LA RUEDAD CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX S.A. DE C.V.**

En la Figura 5.5.102 se puede observar que ambas curvas presentan la misma tendencia.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

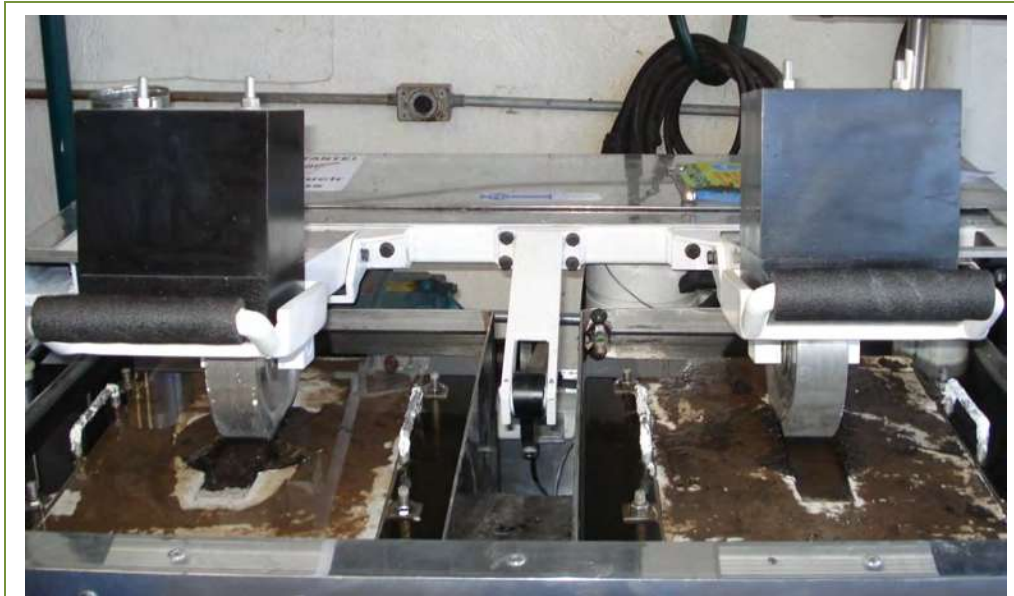


FIGURA 5.5.101

ENSAYO 4, PROBETAS 5 Y 6. DE 6". ELABORADAS CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO.
ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". "SURFAX S.A. DE C.V"

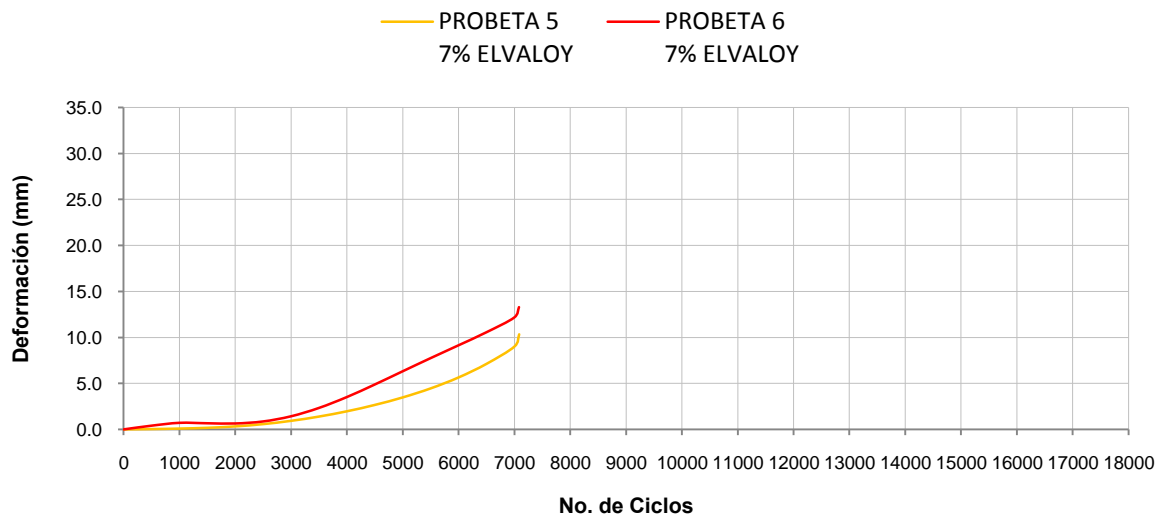


FIGURA 5.5.102

GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 2. PROBETAS 5 Y 6, DE 6". ELABORADAS
CON EL 7% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ENSAYO 5

PROBETAS 10 Y 12 CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA

Este ensayo se realizó en la empresa Sem Materials México, durante la realización de este ensayo se tuvieron muchos problemas con los LVDT's.

La probeta 10 quedó mal centrada, debido a que la carga no estaba aplicada en el centro ella se deformó más. Durante los primeros 1,250 ciclos el LVDT de la probeta 12 no se movió, debido a que se había quedado pegado.

La prueba fue parada debido a que los LVDT's se descompusieron y ya no registraban ninguna lectura.

PROBETA 10		PROBETA 12	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.97	500	11.44
1000	2.03	1000	17.18
1500	3.27	1500	19.34
2000	5.10	2000	19.41
2440	30.58	2440	19.41

TABLA 5.5.37

**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 5.
PROBETAS 10 Y 12 DE 6" ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA.
ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SEM MATERIALS MÉXICO.**



FIGURA 5.5.103

ENSAYO 5, PROBETAS 10 Y 12. DE 6". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO. "SEM MATERIALS MÉXICO"



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

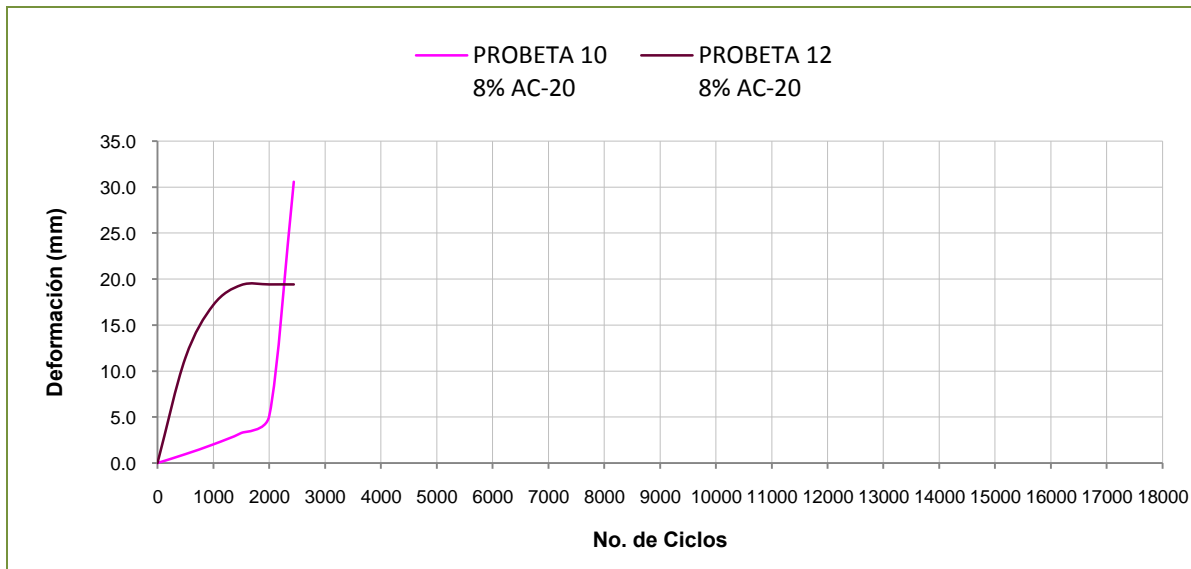


FIGURA 5.5.104

GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 5. PROBETAS 10 Y 12, DE 6". ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"

En la Figura 5.5.104 se puede observar que ambas curvas presentan un comportamiento extraño. Debido a que las lecturas obtenidas no son del todo confiables, en las gráficas de deformación total se utilizarán los resultados hasta los 2000 ciclos.



ENSAYO 6

PROBETAS 10 Y 13 CON ASFALTO MODIFICADO

Este ensayo se realizó en la empresa Surfax S.A. de C.V., el ensayo se inicio bien, pero a los 4,500 ciclos de la prueba, el equipo tuvo una falla y se apago, por lo cual se perdieron los resultados de este ensayo y solo se conservaron las probetas, por consiguiente no se podrá realizar un análisis de los resultados.

En la Figura 5.5.105 se puede observar como se deformaron las probetas hasta los 4,500 ciclos.



Como se contaba con otra probeta fabricada con el 8% de asfalto modificado se decidió repetir este ensayo.



Capítulo 5. Ensayos de Laboratorio

ENSAYO 7

PROBETA 12 CON ASFALTO MODIFICADO

Este ensayo se realizó en la empresa Surfax S.A. de C.V., durante su realización se observó lo mismo que en el ensayo 1, ya que la probeta de la derecha no se encontraba completamente sumergida y se cree que esto pudo influir para que se deformara menos.

PROBETA 12		PROBETA 12	
CICLOS	LECTURA	CICLOS	LECTURA
0	0.00	0	0.00
500	0.54	500	0.31
1000	1.63	1000	0.94
1500	2.75	1500	1.57
2000	3.86	2000	2.19
2500	4.97	2500	2.79
3000	6.05	3000	3.37
3500	7.11	3500	3.93
4000	8.12	4000	4.47
4500	9.09	4500	4.97
5000	10.01	5000	5.45
5500	10.88	5500	5.90
6000	11.70	6000	6.33
6500	12.47	6500	6.74
7000	13.19	7000	7.13
7500	13.86	7500	7.50
8000	14.48	8000	7.87
8500	15.06	8500	8.23
9000	15.61	9000	8.59
9500	16.12	9500	8.95
10000	16.62	10000	9.32
10500	17.09	10500	9.69
11000	17.55	11000	10.07
11500	18.01	11500	10.45
12000	18.47	12000	10.85
12500	18.94	12500	11.25
13000	19.43	13000	11.65
13500	19.93	13500	12.06
14000	20.47	14000	12.45
14500	21.04	14500	12.83
15000	21.64	15000	13.18
15500	22.29	15500	13.49
16000	22.99	16000	13.75
16500	23.73	16500	13.93
17000	24.52	17000	14.02
17500	25.36	17500	13.99
18000	26.19	18000	13.83

TABLA 5.5.38

**RESULTADOS OBTENIDOS A CADA 500 CICLOS DEL ENSAYO 7.
PROBETA 13 DE 6" ELABORADAS CON EL 6% DE ASFALTO MODIFICADO.
ENSAYADAS EN LA RUEDAD CARGADA DE HAMBURGO "HWTD". SURFAX S.A. DE C.V.**



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*



FIGURA 5.5.106

ENSAYO 5, PROBETAS 10 Y 13. DE 6". ELABORADAS CON EL 8% DE ASFALTO, MODIFICADO.
ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTB". "SURFAX S.A. DE C.V"

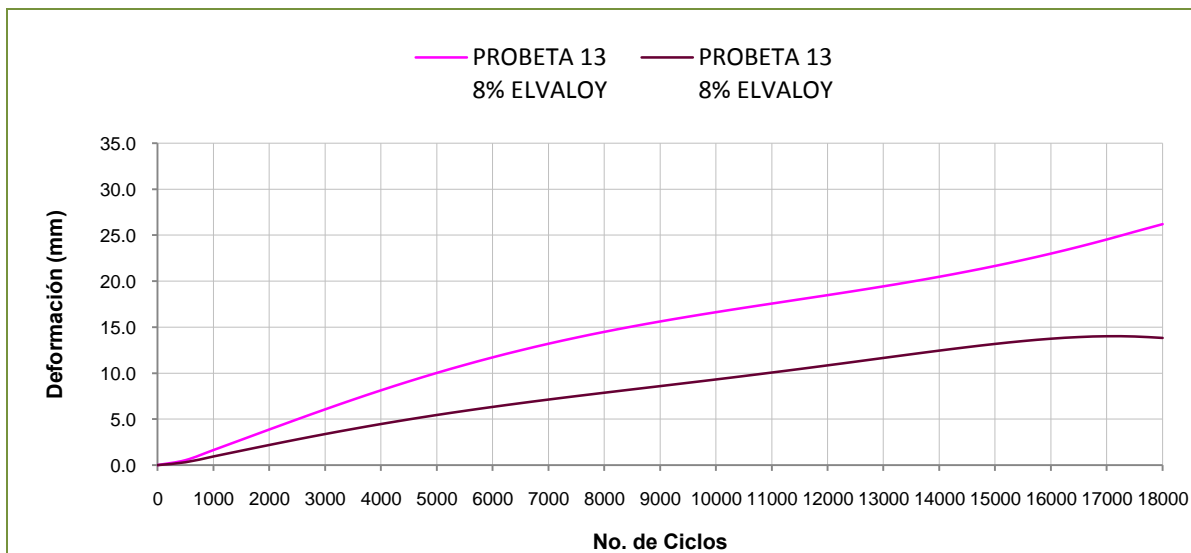


FIGURA 5.5.107

GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DEL ENSAYO 7. PROBETA 13, DE 6". ELABORADA
CON EL 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

Como se puede observar en la Figura 5.5.107 este fue el ensayo que se logró realizar con un mayor número de ciclos,



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.108 se muestran las gráficas de los resultados obtenidos con los distintos porcentajes de Asfalto AC- 20 de Salamanca y en la figura 5.5.109 se muestran las gráficas de los resultados obtenidos con los distintos porcentajes de Asfalto modificado.

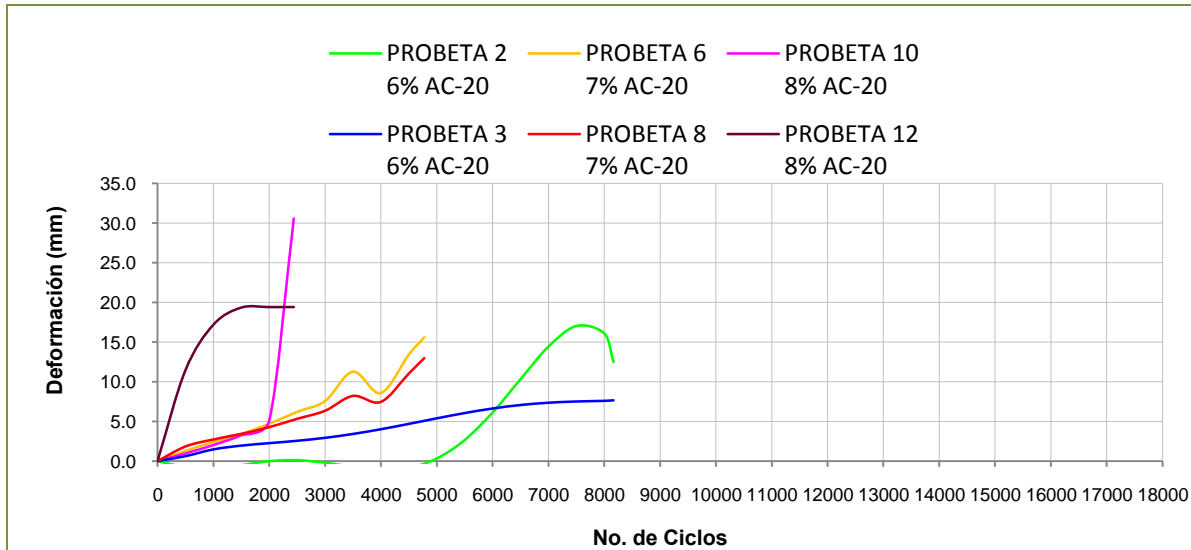


FIGURA 5.5.108
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LAS PROBETAS 2, 3, 6, 8,10 Y 12. ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

Para el análisis de resultados no se utilizarán los resultados de la probeta 2 elaborada con el 6% de Asfalto. Se promediarán los resultados de las probetas 6 y 8 elaboradas con el 7% de Asfalto. No se utilizarán los resultados de la probeta 12 elaborada con el 8% de Asfalto.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

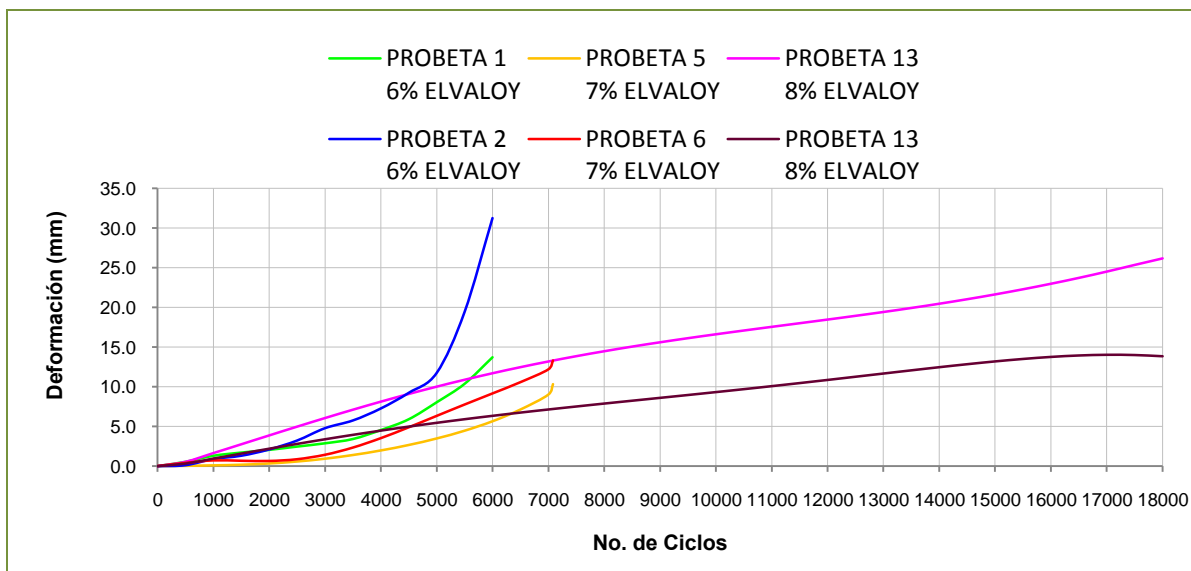


FIGURA 5.5.109
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LAS PROBETAS 1, 2, 5, 6 Y 13. ELABORADAS CON EL 6%, 7% Y 8% DE ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO

Para el análisis de resultados se promediarán los resultados hasta los 5,000 ciclos de las probetas 1 y 2 elaboradas con el 6% de Asfalto. Se promediarán los resultados de las probetas 5 y 6 elaboradas con el 7% de Asfalto. Se promediarán los resultados de la probeta 13 elaborada con el 8% de Asfalto.



Capítulo 5. *Ensayos de Laboratorio*

En la Figura 5.5.110 se pueden observar en las deformaciones totales a los distintos ciclos que se corrió cada una de las pruebas.

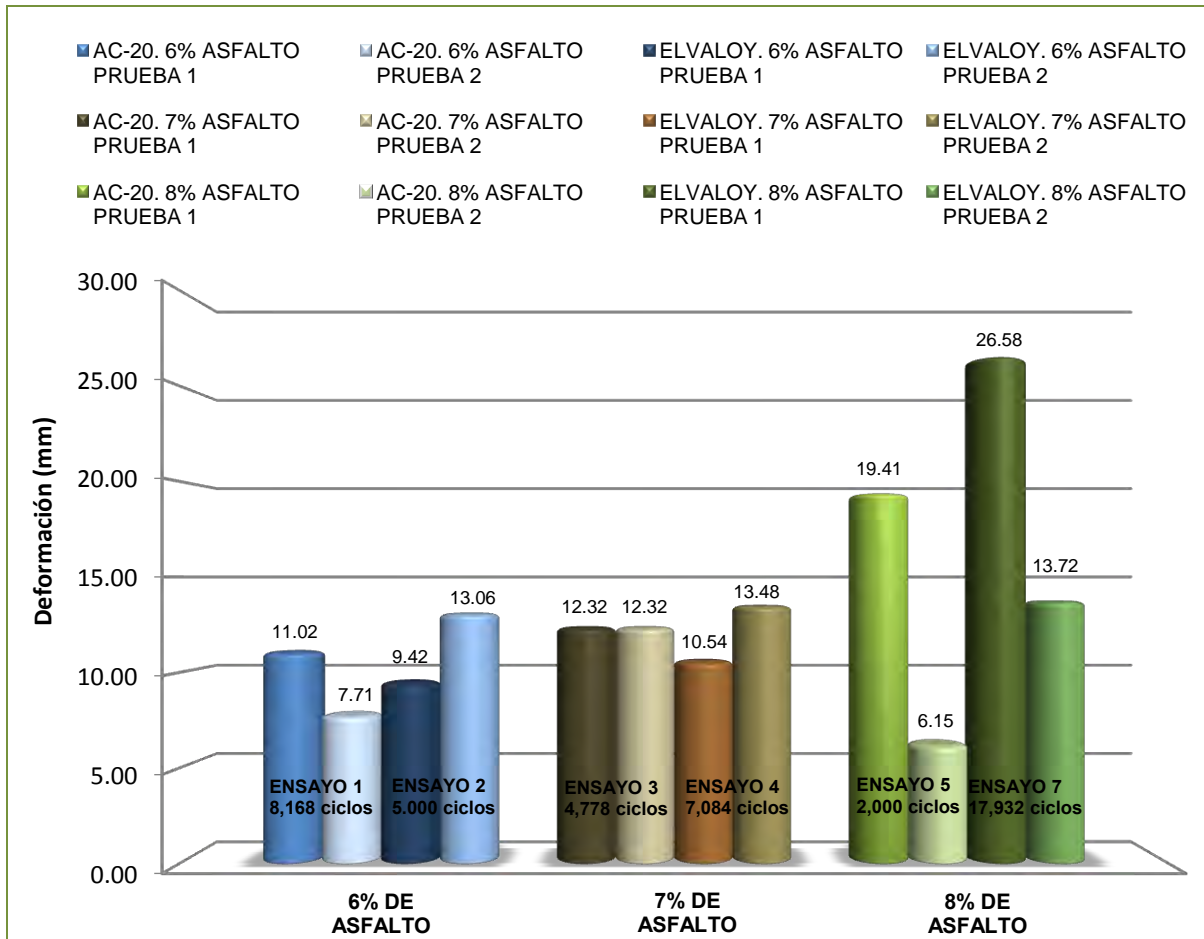


FIGURA 5.5.110

DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 6" A LOS DISTINTOS NÚMEROS DE CICLOS.
PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO.
ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"

Para el análisis de resultados no se utilizarán los resultados del ensayo 1, probeta 2 elaborada con el 6% de Asfalto AC-20 de Salamanca. Se promediarán los resultados del ensayo 2 de las probetas con el 6% de Asfalto modificado. Se promediarán los resultados del ensayo 3 de las probetas con el 7% de Asfalto AC-20 de Salamanca. Se promediarán los resultados del ensayo 4 de las probetas con el 7% de Asfalto modificado. No se utilizarán los resultados del ensayo 5, probeta 12 elaborada con el 8% de Asfalto AC-20 de Salamanca. Se promediarán los resultados del ensayo 7 de las probetas con el 8% de Asfalto modificado.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS





CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 INTRODUCCIÓN

Cada una de las pruebas realizadas se hizo por duplicado, sin embargo debido a los distintos problemas que se presentaron en los ensayos, los cuales se mencionaron en el Capítulo 5, tuvieron que descartarse algunos de ellos.

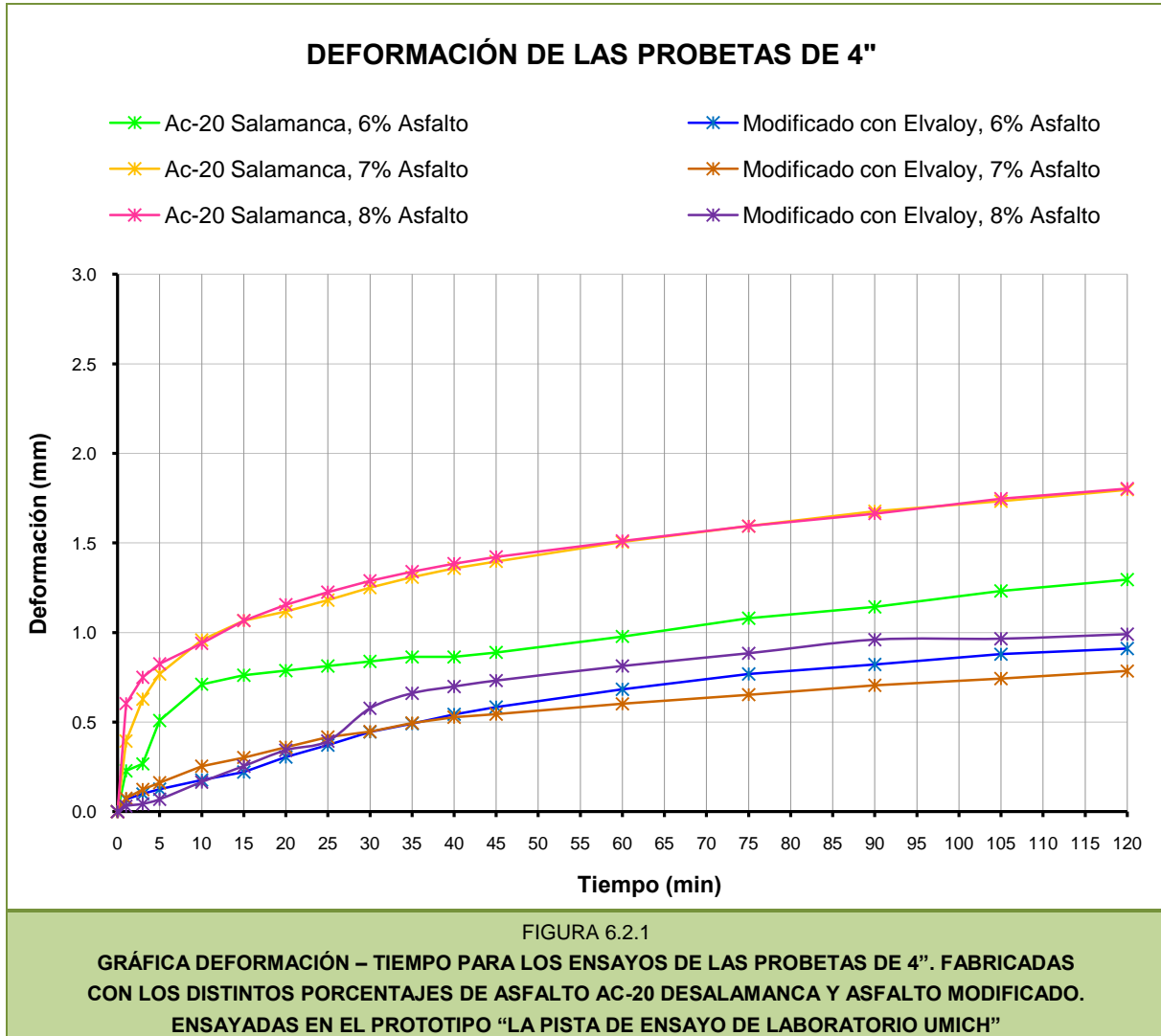
Para aquellos ensayos en cuyo caso su replica tenía la misma tendencia se decidió promediar los datos obtenidos.

A continuación se realizará el análisis de resultados de las pruebas ensayadas en la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH, el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA” y la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTM”; además, se realizará una comparación entre ellos.



6.2 PROTOTIPO “PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH”

En la Figura 6.2.1 se muestran los resultados de las pruebas de 4” elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca, así como con Asfalto modificado.

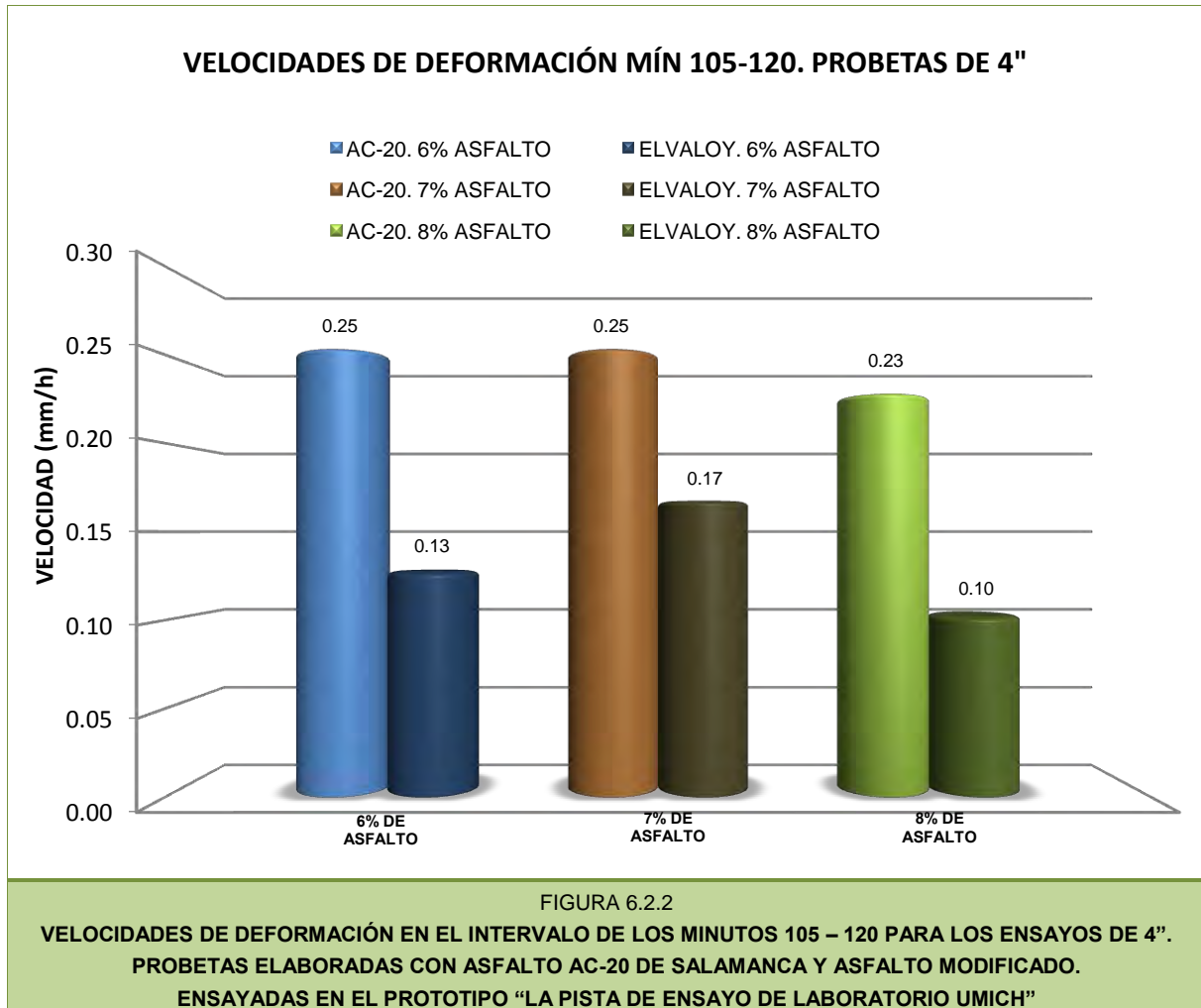


Se puede observar en la Figura 6.2.1 en todos los casos las probetas fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca se deforman más que las fabricadas con asfalto modificado. De las probetas fabricadas con AC-20 de Salamanca, se deformó menos la que tenía el 6% de asfalto y las del 7% y 8% prácticamente se deformaron igual; de las fabricadas con asfalto modificado se deformó menos la del 7%, posteriormente la del 6% y la del 8%.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.2.2 se muestran las velocidades de deformación de las probetas de 4" elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto modificado.



En la Figura 6.6.2 se observa que las probetas fabricadas con Asfalto AC-20 de Salamanca se deforman más rápido que las fabricadas con Asfalto modificado.

Las probetas fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca, se deforman prácticamente a la misma velocidad. En el caso de las fabricadas con Asfalto modificado se deforma más rápidamente la del 7%, posteriormente la del 6% y finalmente la del 8%.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.2.3 se muestran los resultados de las pruebas de 6" elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto modificado.

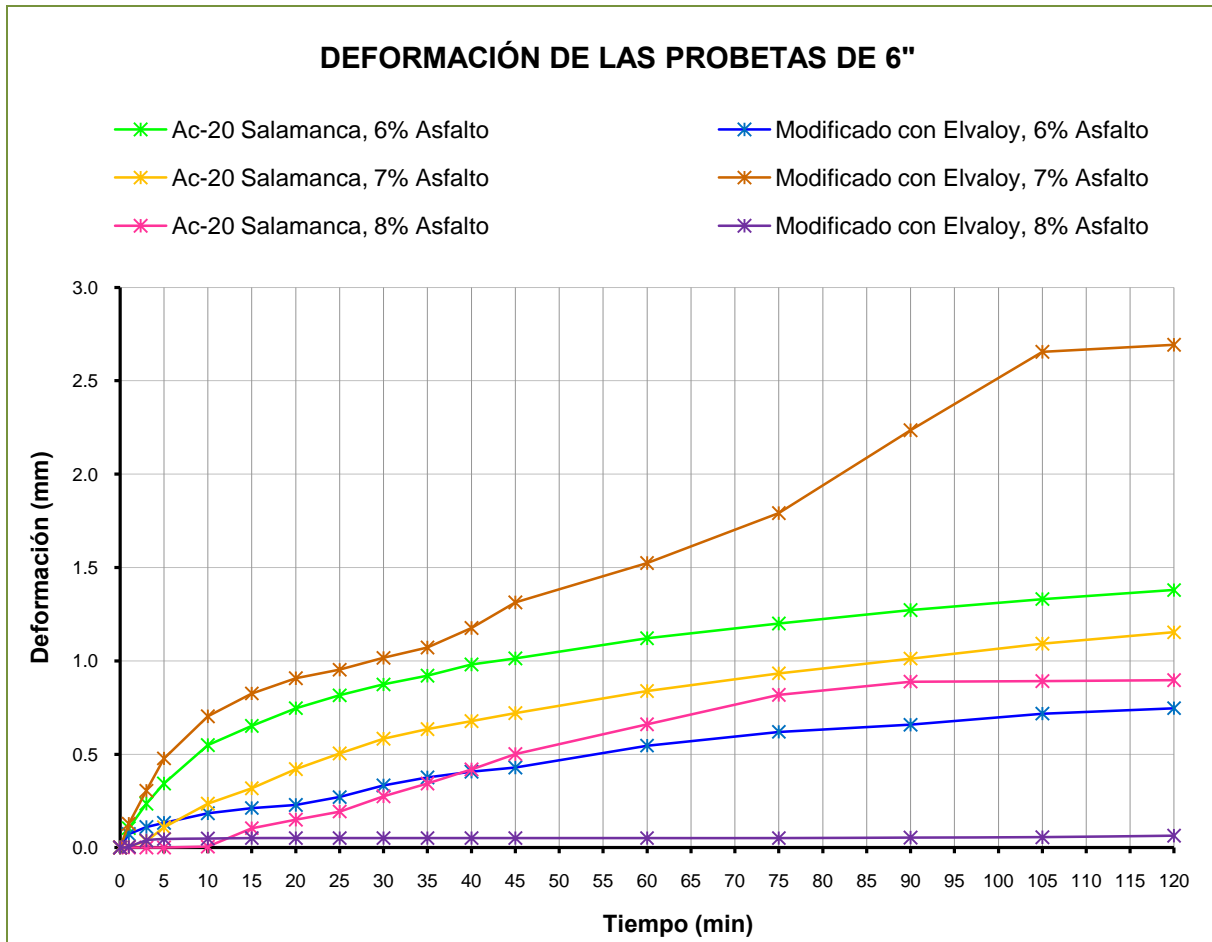


FIGURA 6.2.3

GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DESALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN EL PROTOTIPO "PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH"

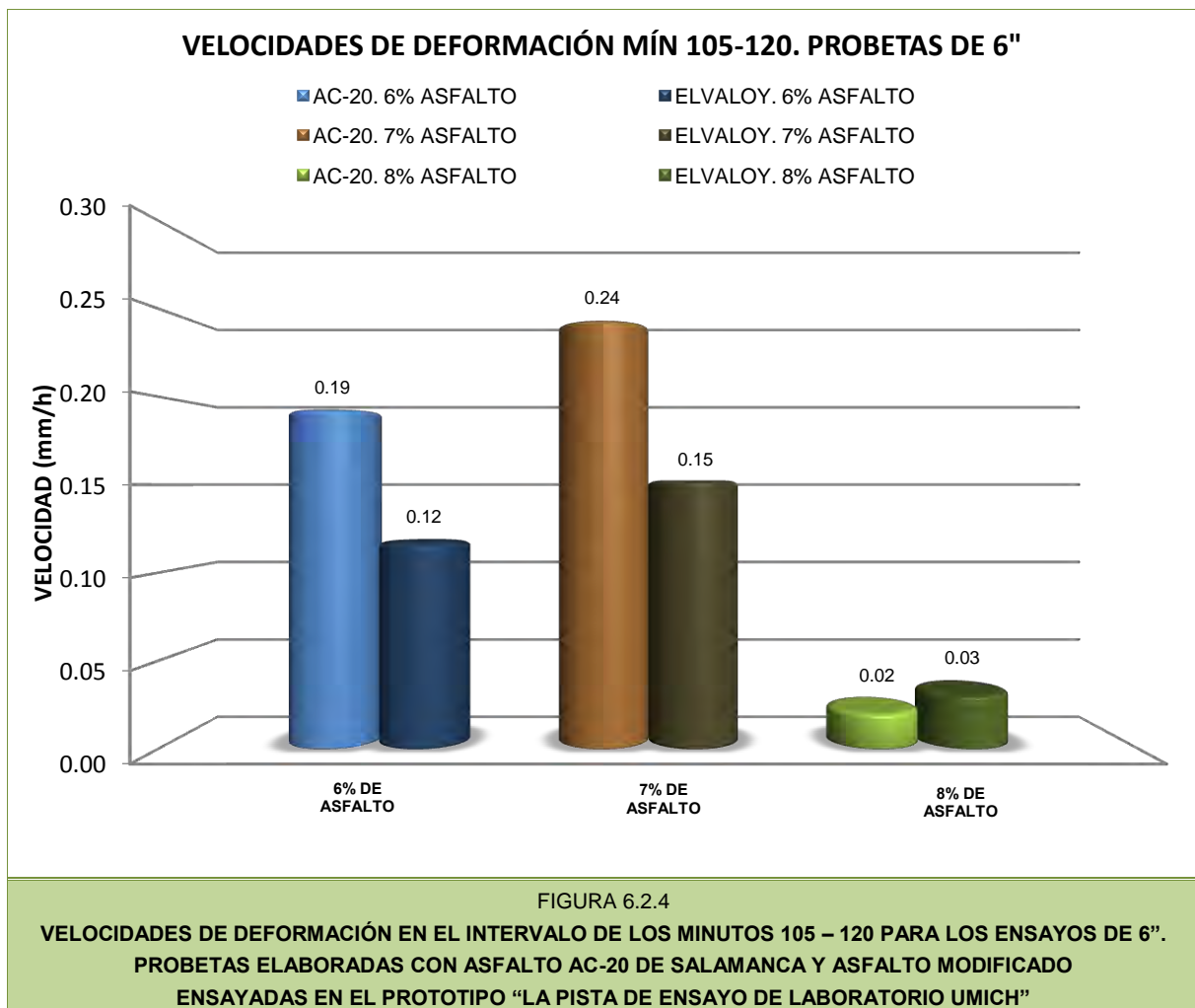
Se puede observar en la Figura 6.2.3 que las probetas fabricadas con el 6% y 8% de asfalto AC-20 de Salamanca se deforman más que las fabricadas con el 6% y 8% de asfalto modificado; sin embargo, la probeta fabricada con el 7% de asfalto AC-20 de Salamanca se deformó más que la fabricada con el 7% de asfalto modificado, por lo que se cree que pudo existir algún problema con este ensayo, ya que en todos los otros ensayos las probetas fabricadas con asfalto modificado resistieron mas que las fabricadas con AC-20 de Salamanca.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

De las probetas fabricadas con AC-20 de Salamanca, se deformó menos la que tenía el 8% de asfalto y posteriormente la del 7% y la del 6%; de las fabricadas con asfalto modificado se deformó menos la del 8%, posteriormente la del 6% y la del 7%.

En la Figura 6.2.4 se muestran las velocidades de deformación de las probetas de 6" elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto modificado.

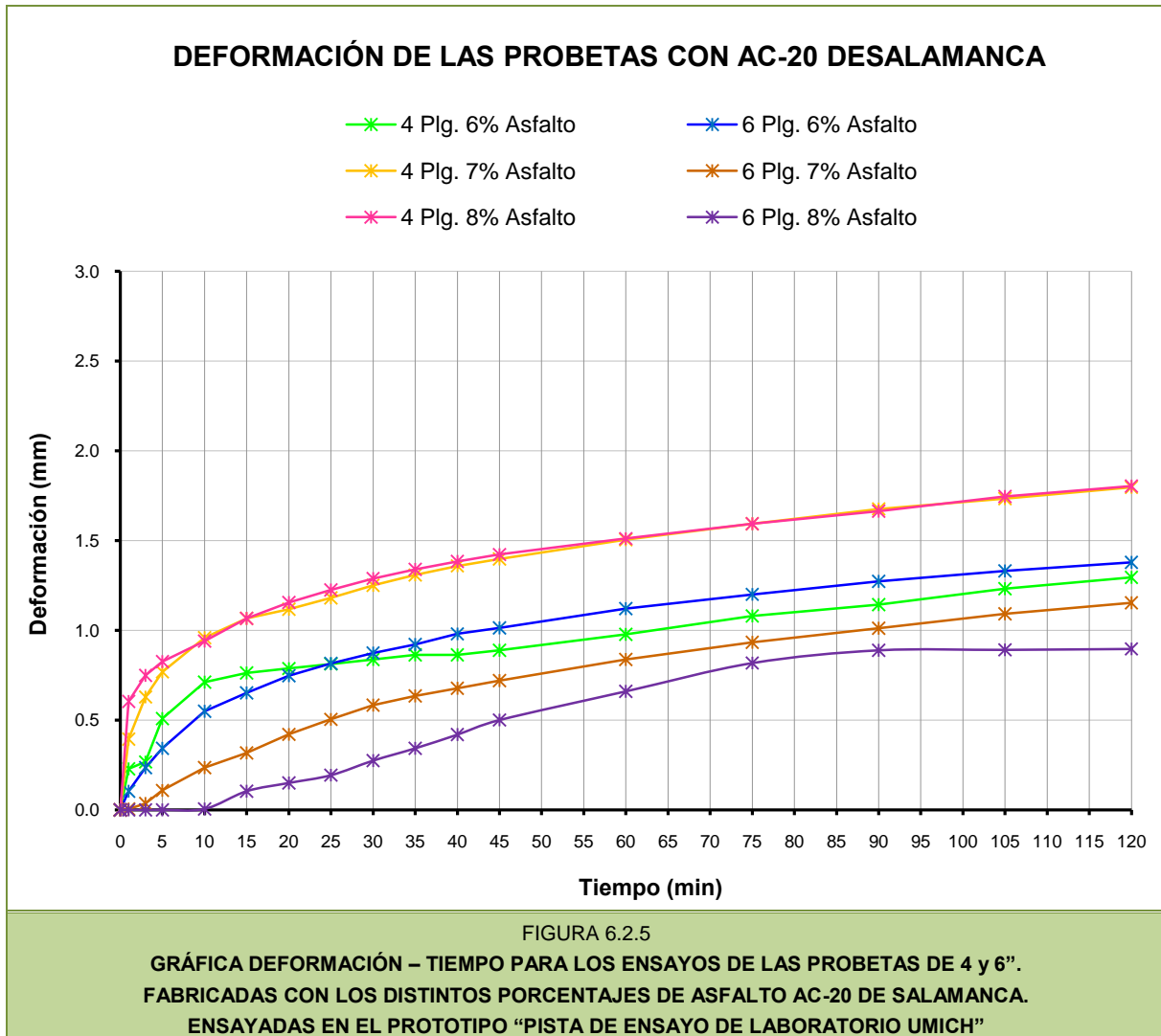


En la Figura 6.2.4 se observa que las probetas fabricadas con el 6 Y 7% asfalto AC-20 de Salamanca se deforman más rápido que las fabricadas con el 6% y 7% de asfalto modificado. Las probetas fabricadas con el 8% de ambos asfaltos se deforman prácticamente a la misma velocidad.



Capítulo 6. *Análisis de Resultados*

En la Figura 6.2.5 se muestran los resultados de las pruebas de 4" y 6" elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca.

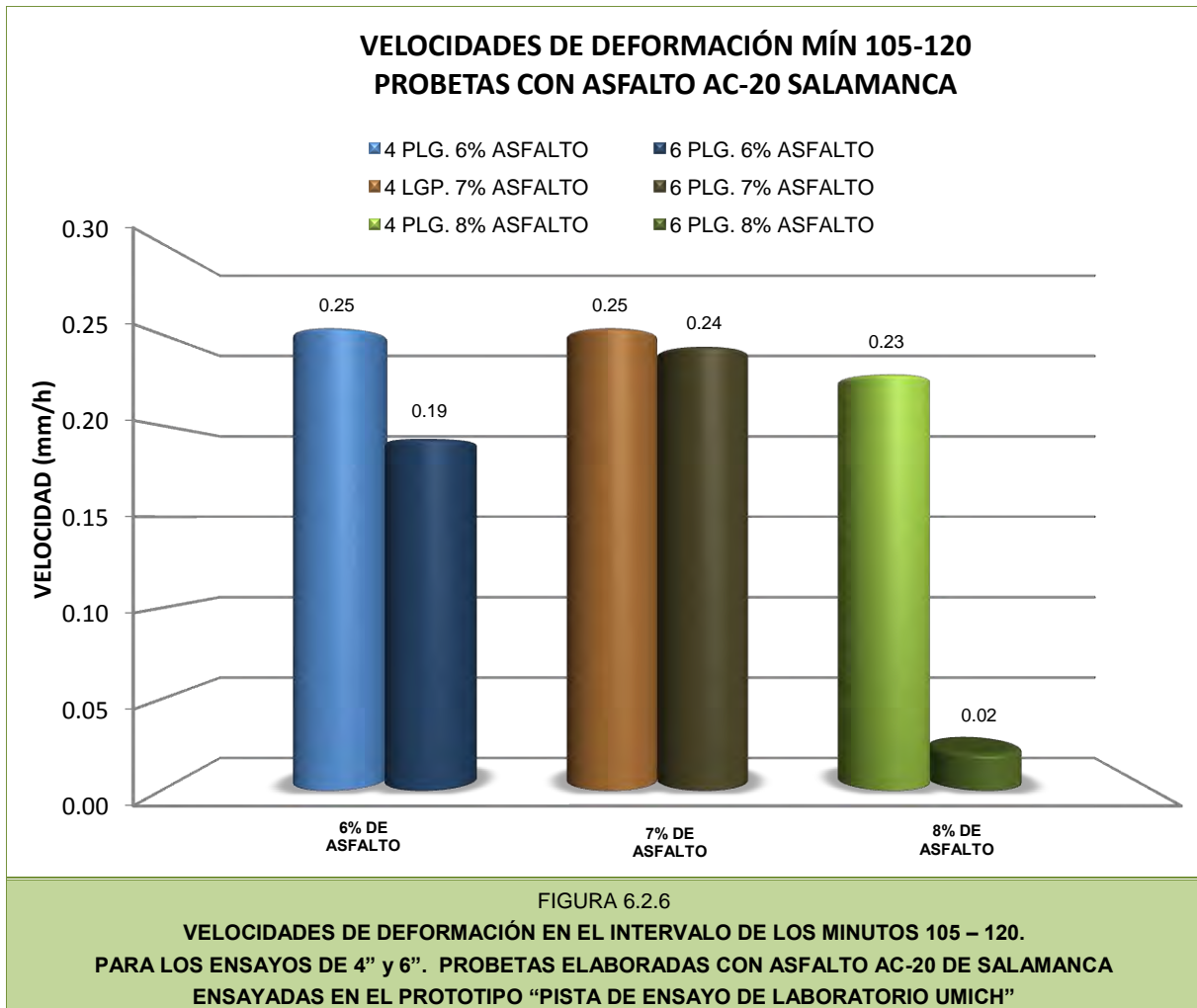


Se puede observar en la Figura 6.2.5 que las probetas fabricadas con el 7 % de Asfalto tienen la misma tendencia; sin embargo, esto no sucede con las fabricadas con el 6% y 8%.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.2.6 se muestran las velocidades de deformación de las probetas de 4" y 6" elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca.

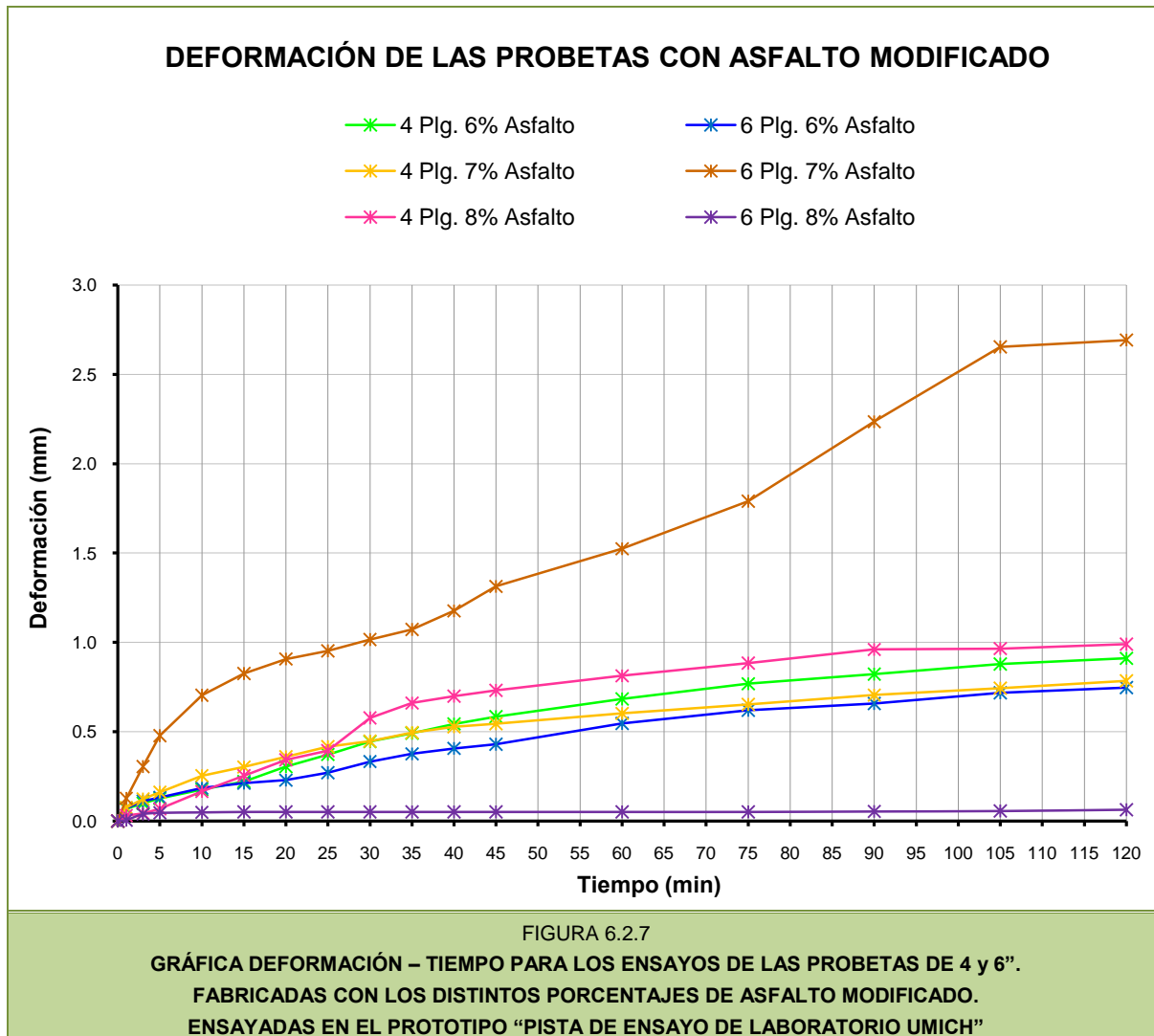


En la Figura 6.2.6 se observa que las probetas fabricadas AC-20 de Salamanca mantienen la prácticamente la misma velocidad de deformación a excepción del ensayo con de 6" fabricada con el 8% de asfalto modificado.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.2.7 se muestran los resultados de las pruebas de 4" y 6" elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto modificado.

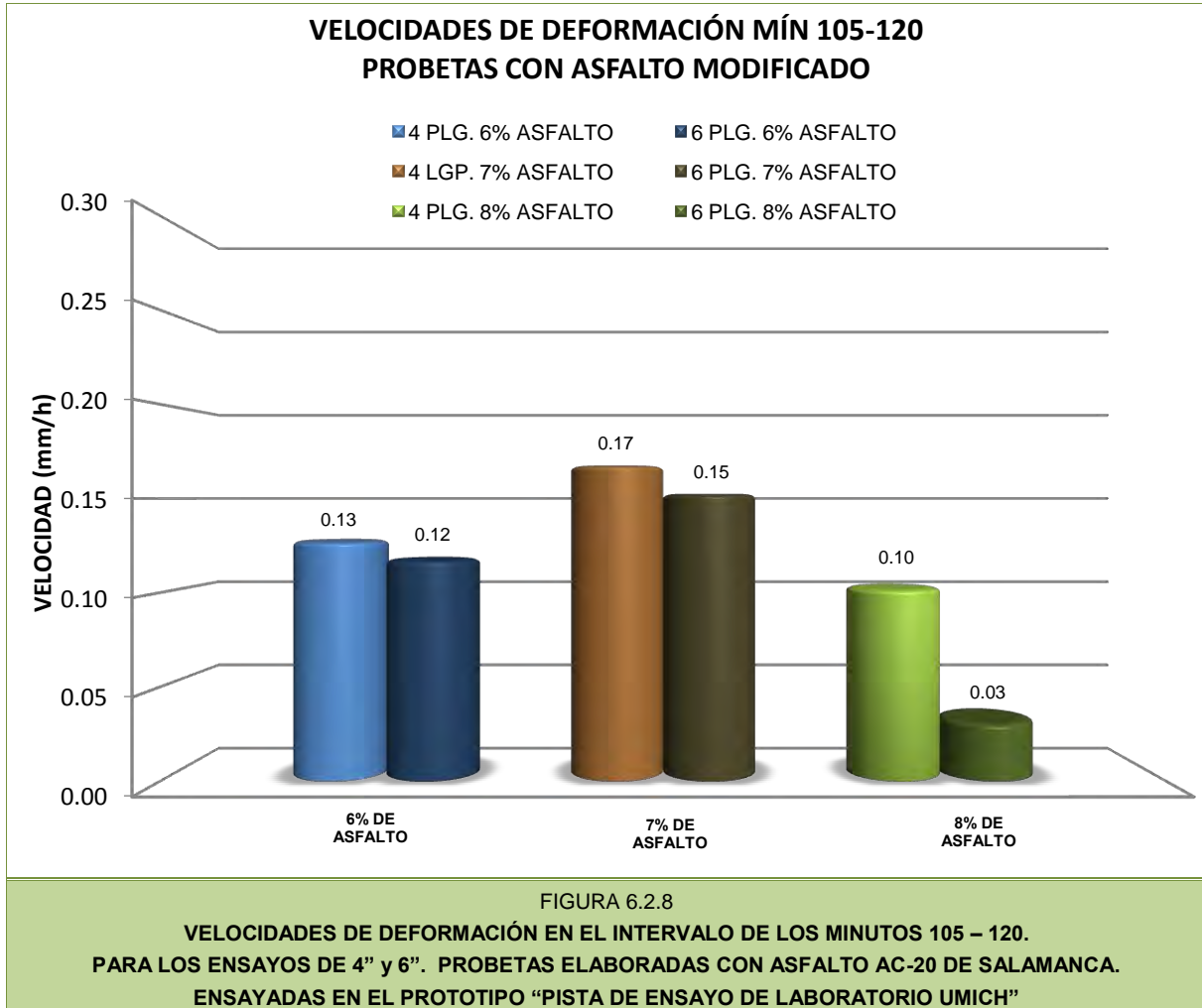


Se puede observar en la Figura 6.2.7 que las probetas fabricadas con el 6% de Asfalto tienen la misma tendencia; sin embargo, esto no sucede con las fabricadas con el 7% y 8%.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.2.8 se muestran las velocidades de deformación de las probetas de 4" y 6" elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca.

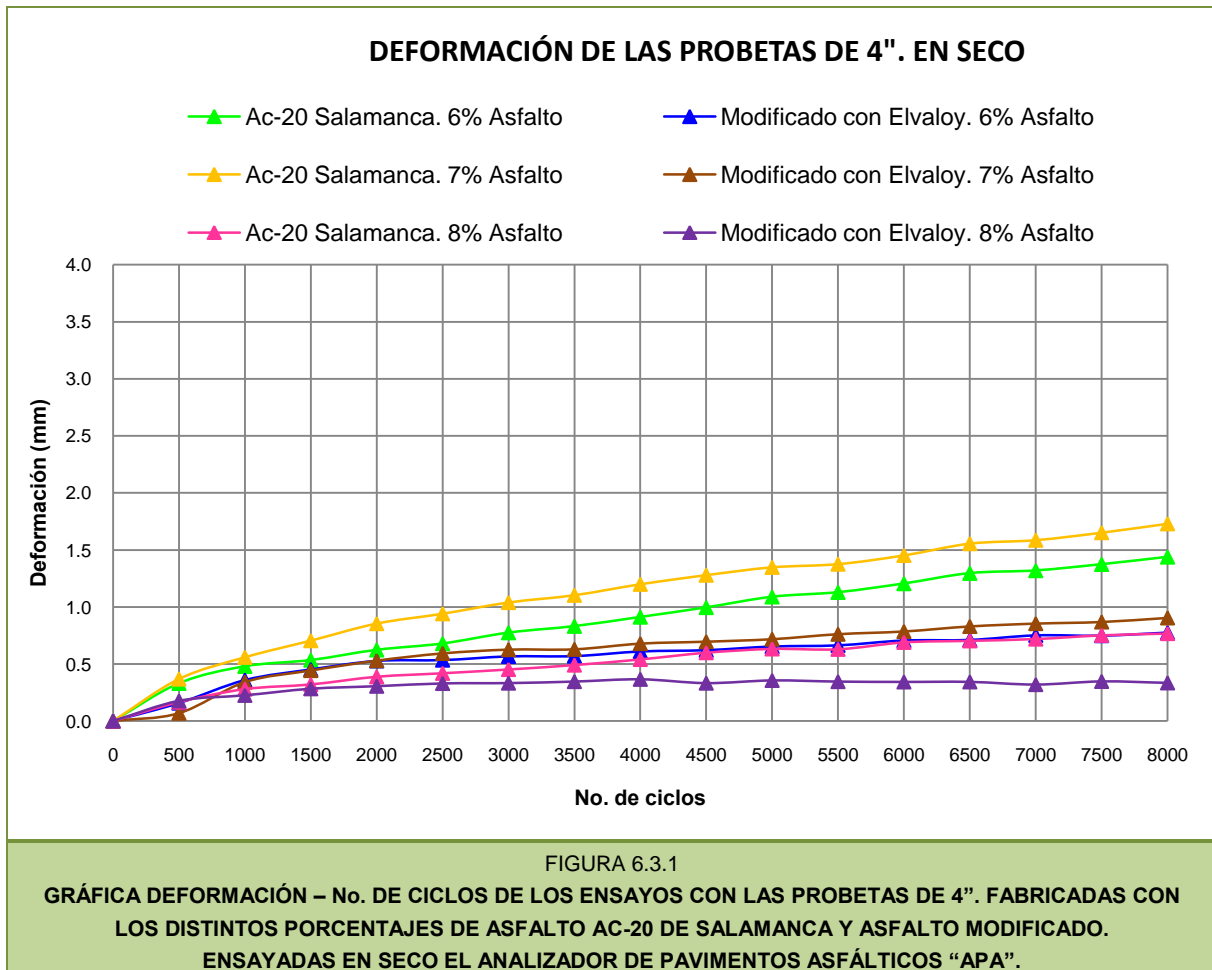


En la Figura 6.2.8 se observa que las probetas fabricadas con el 6% y 7% con asfalto AC-20 de Salamanca y asfalto modificado mantienen la prácticamente la misma velocidad de deformación, a excepción de las fabricadas con el 8% de asfalto.



6.3 ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA”

En la Figura 6.3.1 se muestran los resultados de las pruebas de 4” en seco, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto modificado.

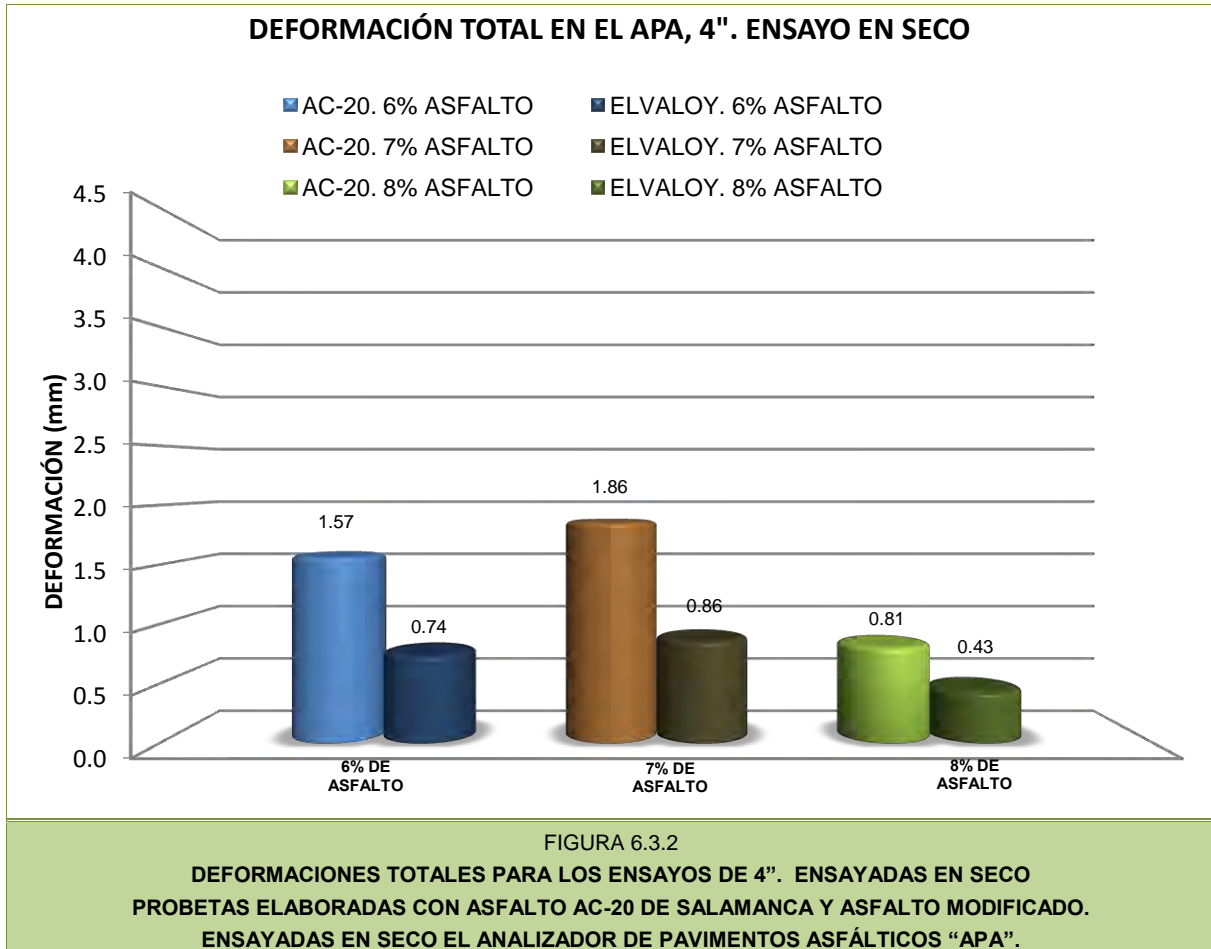


En la Figura 6.3.1 en todos los casos las probetas fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca se deforman más que las fabricadas con asfalto modificado. También se puede observar que las probetas que menos se deformaron tanto fabricadas con AC-20 de Salamanca como con asfalto modificado fueron las del 7%, posteriormente las del 6% y finalmente las del 8%.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.3.2 se muestran las deformaciones totales de las probetas de 4" ensayadas en seco, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados, tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con asfalto modificado.



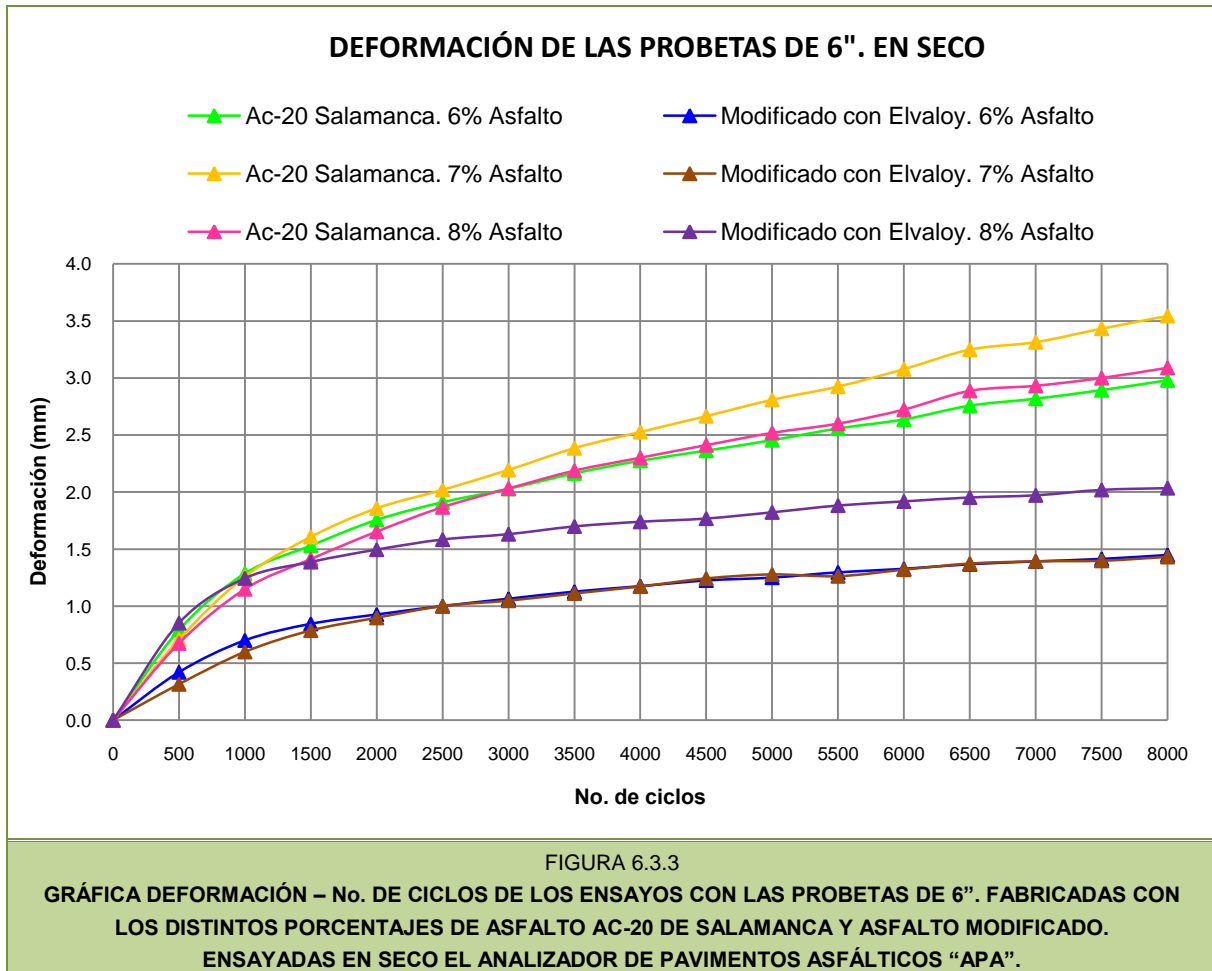
En la Figura 6.3.2 se observa que las probetas fabricadas con asfalto modificado se deforman prácticamente el 50% menos que las fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca.

La deformación de las probetas mantiene la misma tendencia, ya que se deforman más las que contienen el 7% de asfalto, posteriormente las que contienen el 6%, deformándose menos las que contienen el 8%.



Capítulo 6. *Análisis de Resultados*

En la Figura 6.3.3 se muestran los resultados de las pruebas de 6" en seco, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto modificado.



En la Figura 6.3.3 en todos los casos las probetas fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca se deforman más que las fabricadas con asfalto modificado. También se puede observar que las probetas fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca que menos se deformaron fueron las del 6%, posteriormente la del 8% y finalmente las del 7%. De las probetas fabricadas con asfalto modificado que menos se deformaron fueron las del 7%, posteriormente la del 6% y finalmente las del 8%.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.3.4 se muestran las deformaciones totales de las probetas de 6" ensayadas en seco, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados, tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con asfalto modificado.

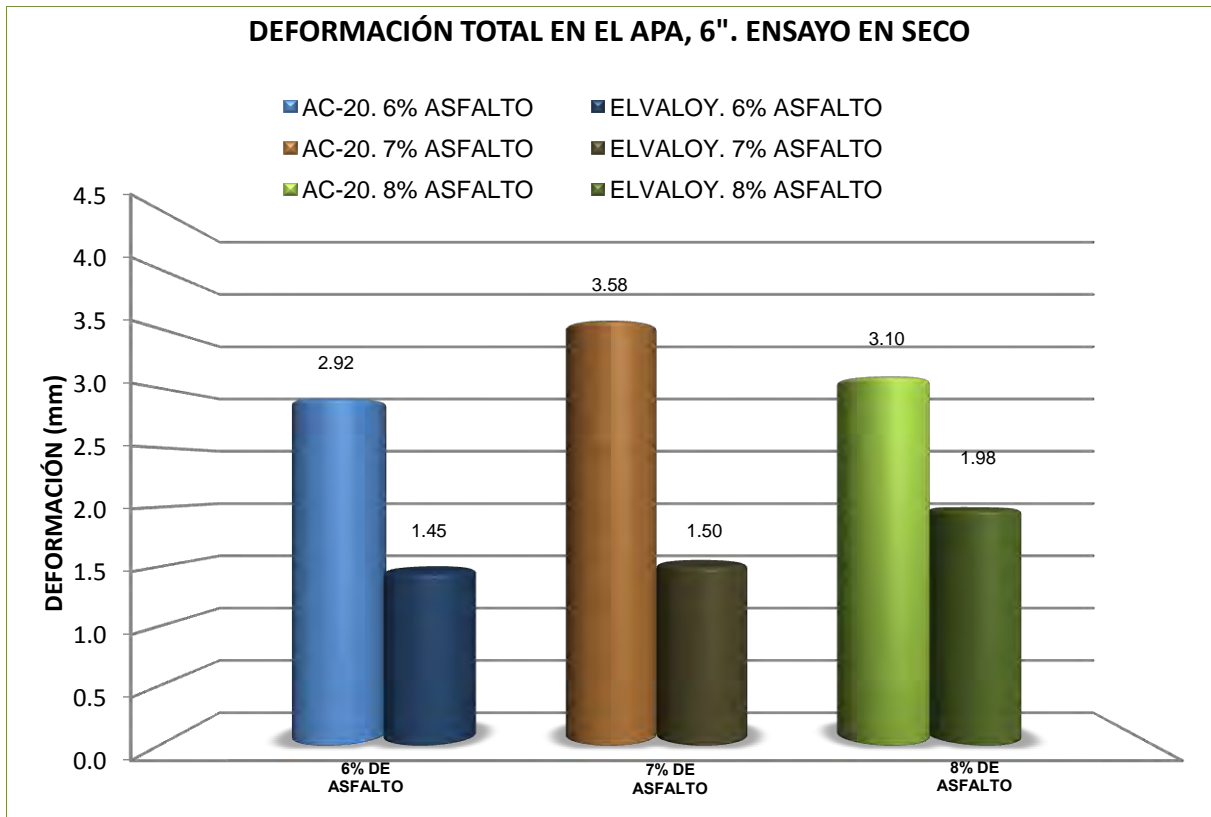


FIGURA 6.3.4
DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 6". ENSAYADAS EN SECO
PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO.
ENSAYADAS EN SECO EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".

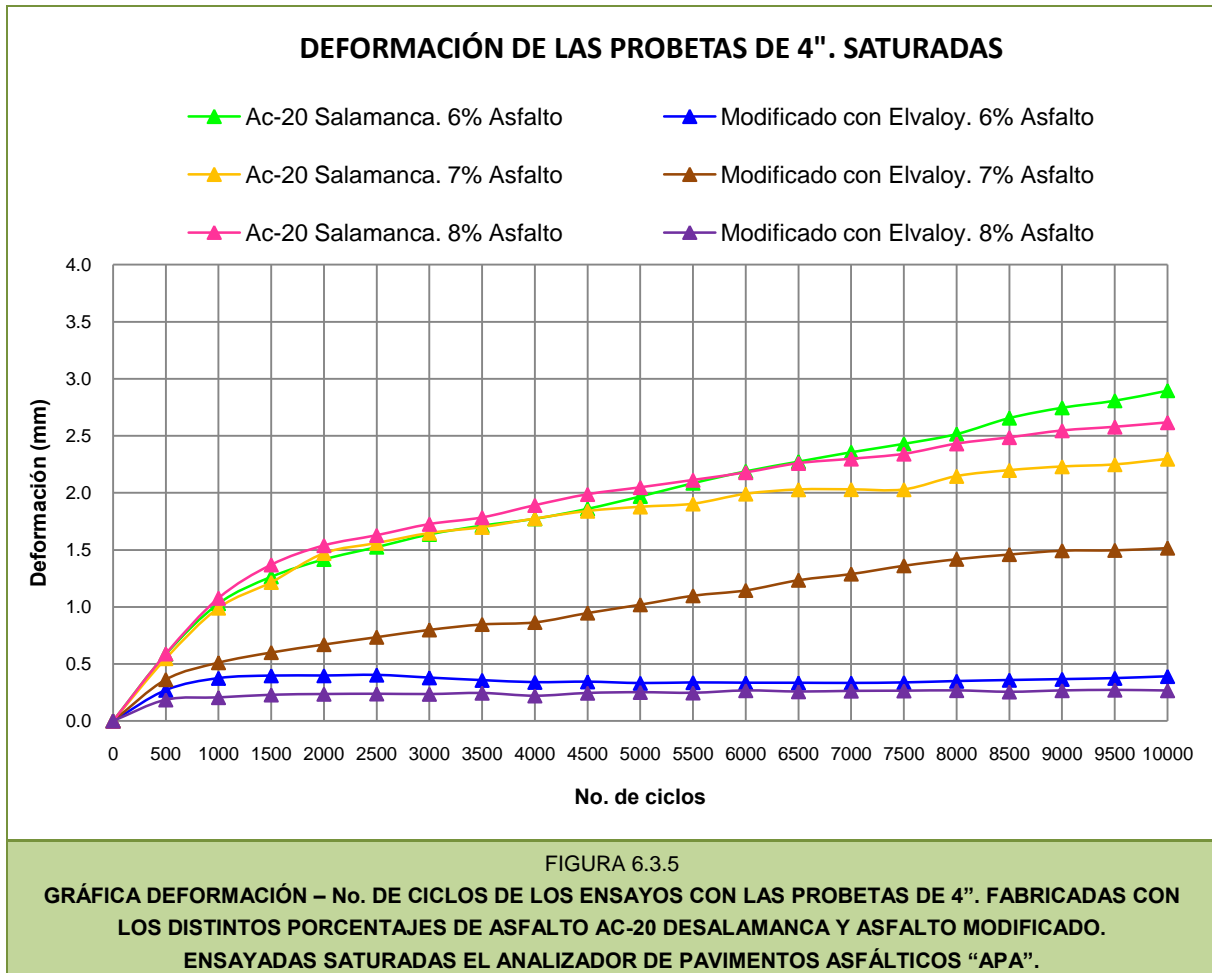
En la Figura 6.3.4 se observa que las probetas fabricadas con asfalto modificado se deforman entre el 40% y 60% menos que las fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca.

De las probetas fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca se deforman más las que contienen el 7% de asfalto, posteriormente las que contienen el 8%, deformándose menos las que contienen el 6%. De las probetas fabricadas con asfalto modificado se deforman más las que contienen el 8% de asfalto, posteriormente las que contienen el 7%, deformándose menos las que contienen el 6%, las 2 últimas se deforman prácticamente lo mismo.



Capítulo 6. *Análisis de Resultados*

En la Figura 6.3.5 se muestran los resultados de las pruebas de 4" saturadas, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto modificado.



En la Figura 6.3.5 en todos los casos las probetas fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca se deforman más que las fabricadas con asfalto modificado. También se puede observar que las probetas fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca que menos se deformaron fueron las del 7%, posteriormente la del 8% y finalmente las del 6%. De las probetas fabricadas con asfalto modificado las que menos se deformaron fueron las del 8%, posteriormente la del 6% y finalmente las del 7%.



Capítulo 6. *Análisis de Resultados*

En la Figura 6.3.6 se muestran las deformaciones totales de las probetas de 4" ensayadas en saturado, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados, tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con asfalto modificado.

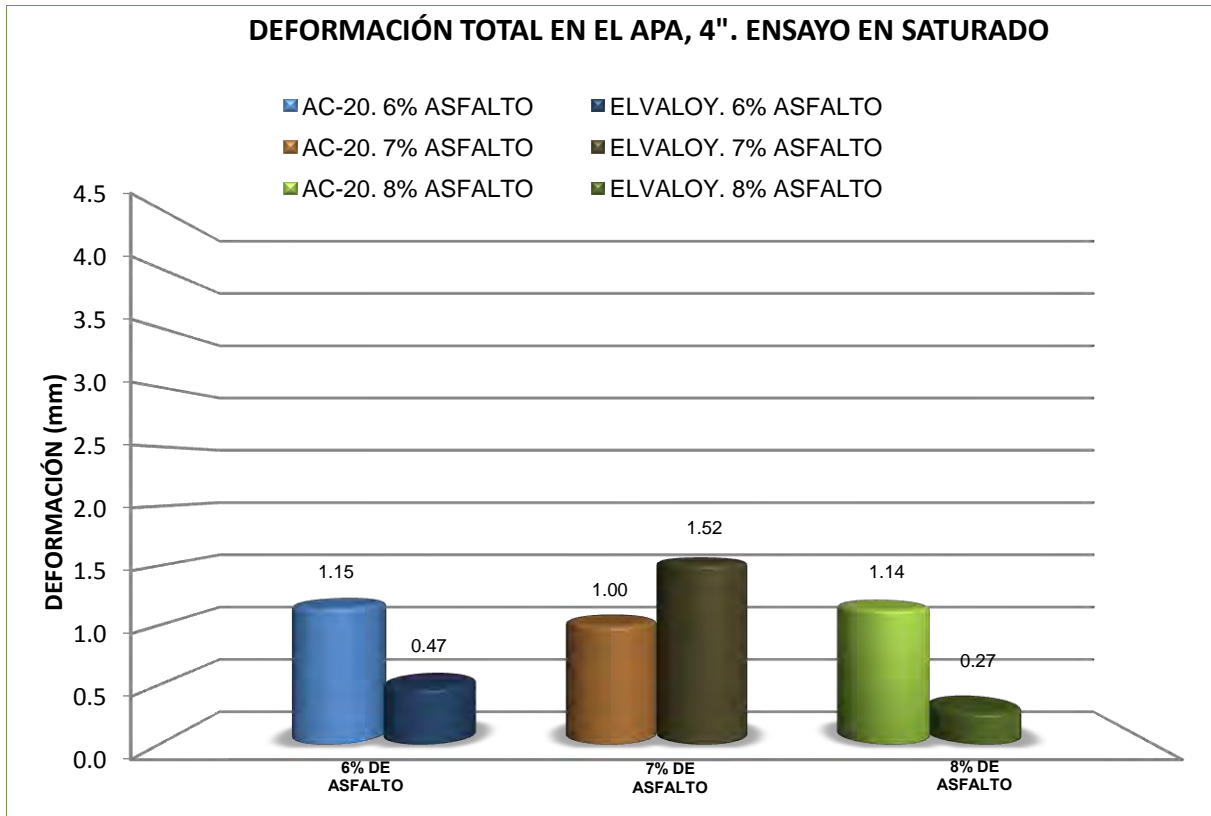


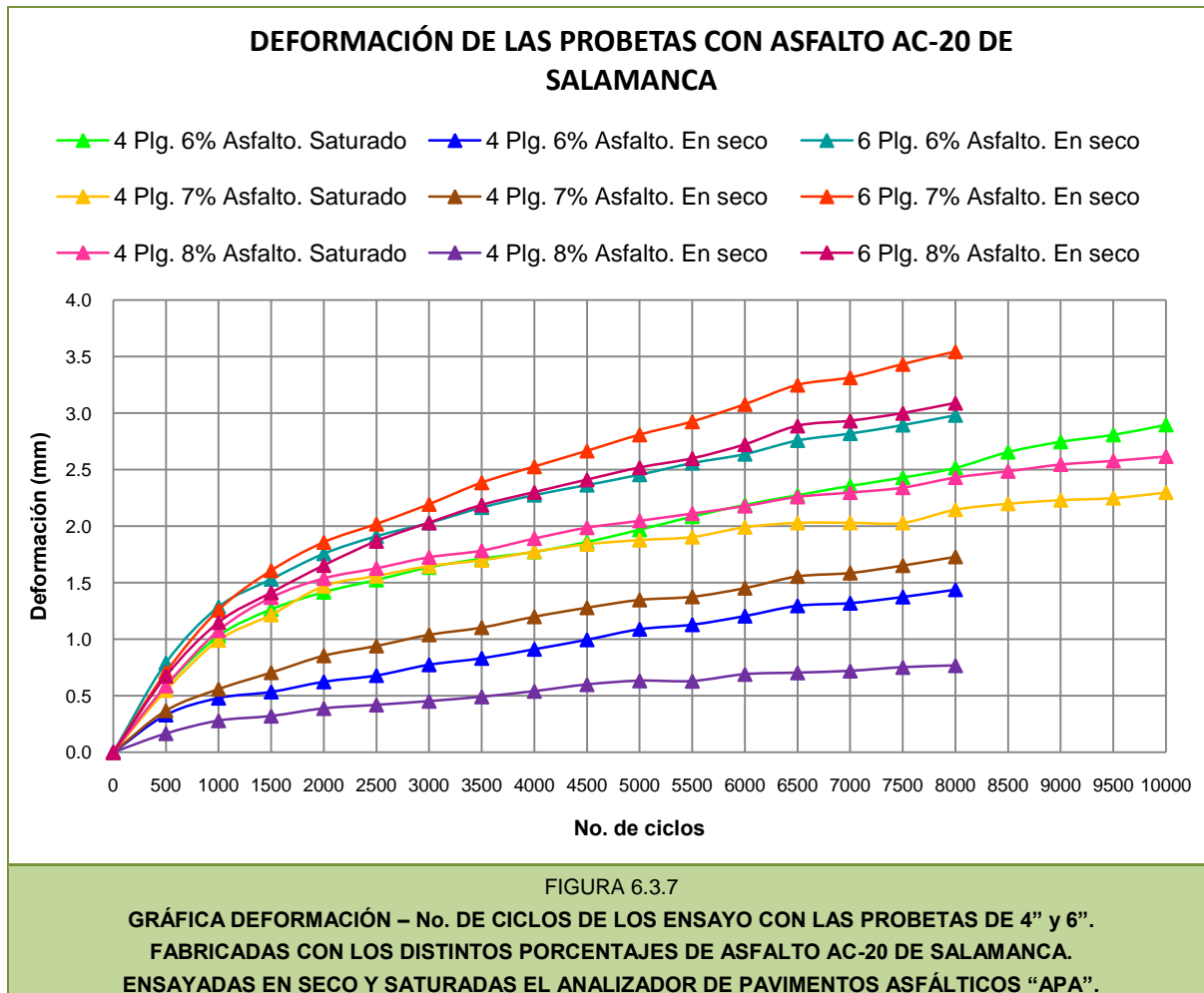
FIGURA 6.3.6
DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 4". ENSAYADAS EN SATURADO
PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO.
ENSAYADAS SATURADAS EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".

En la Figura 6.3.2 se observa que las probetas fabricadas con el 6% y 8% de asfalto AC-20 de Salamanca se deforman más que las fabricadas con asfalto modificado. Al parecer las probetas fabricadas con el 7% de asfalto modificado se deforman más que las fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca, lo cual es ilógico y se cree que pudo existir algún error en la adquisición de los datos.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.3.7 se muestran los resultados de las pruebas de 4" y 6" en seco y saturadas, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca.



En la Figura 6.3.7 se observa que en todos los casos las probetas de 4" ensayadas en seco son las que se deforman menos, posteriormente las de 4" ensayadas saturadas y las que se deforman más son las de 6" ensayadas en seco.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.3.8 se muestran las deformaciones totales de las probetas de 4" y 6" ensayadas en seco y saturado, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca.

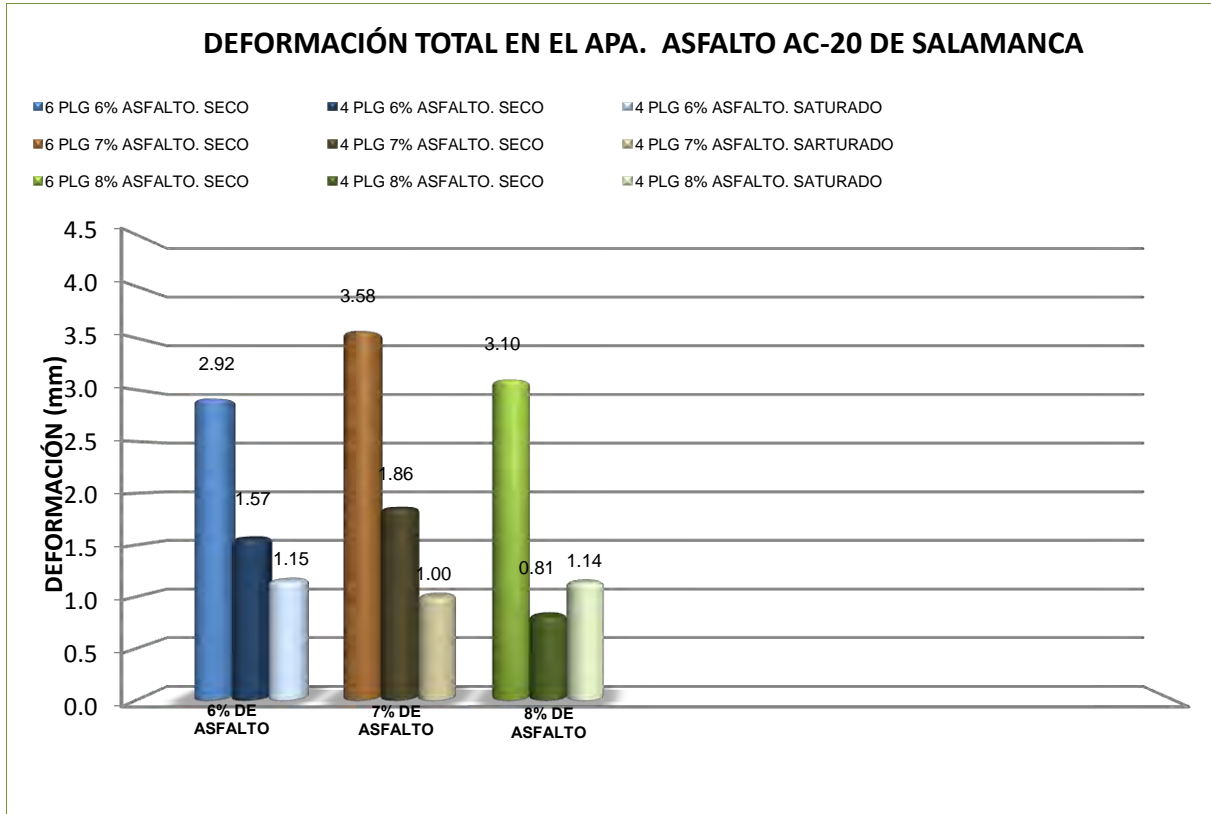


FIGURA 6.3.8
DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 4" Y 6".
FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA.
ENSAYADAS EN SECO Y SATURADAS EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA".

En la Figura 6.3.8 se observa que en todos los casos las probetas que más se deformaron fueron las de 6", posteriormente las de 4" ensayadas en seco y finalmente las de 4" ensayadas en saturado, a excepción de la fabricada con el 8% de asfalto AC-20 de Salamanca ensayada en saturado, la cual se deformó más que la fabricadas con el 8% de asfalto AC-20 de Salamanca ensayada en seco.

En el caso de las probetas de 4" y 6" ensayadas en seco, las que más se deformaron fueron las fabricadas con el 7%, posteriormente la del 8% y las menos deformadas fueron las del



Capítulo 6. *Análisis de Resultados*

6%. Para las probetas de 4” ensayadas en saturado las mas deformadas fueron las fabricadas con el 6% de asfalto, posteriormente las del 8% y finalmente las del 7%.

En la Figura 6.3.9 se muestran los resultados de las pruebas de 4” y 6” en seco y saturadas, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto modificado.

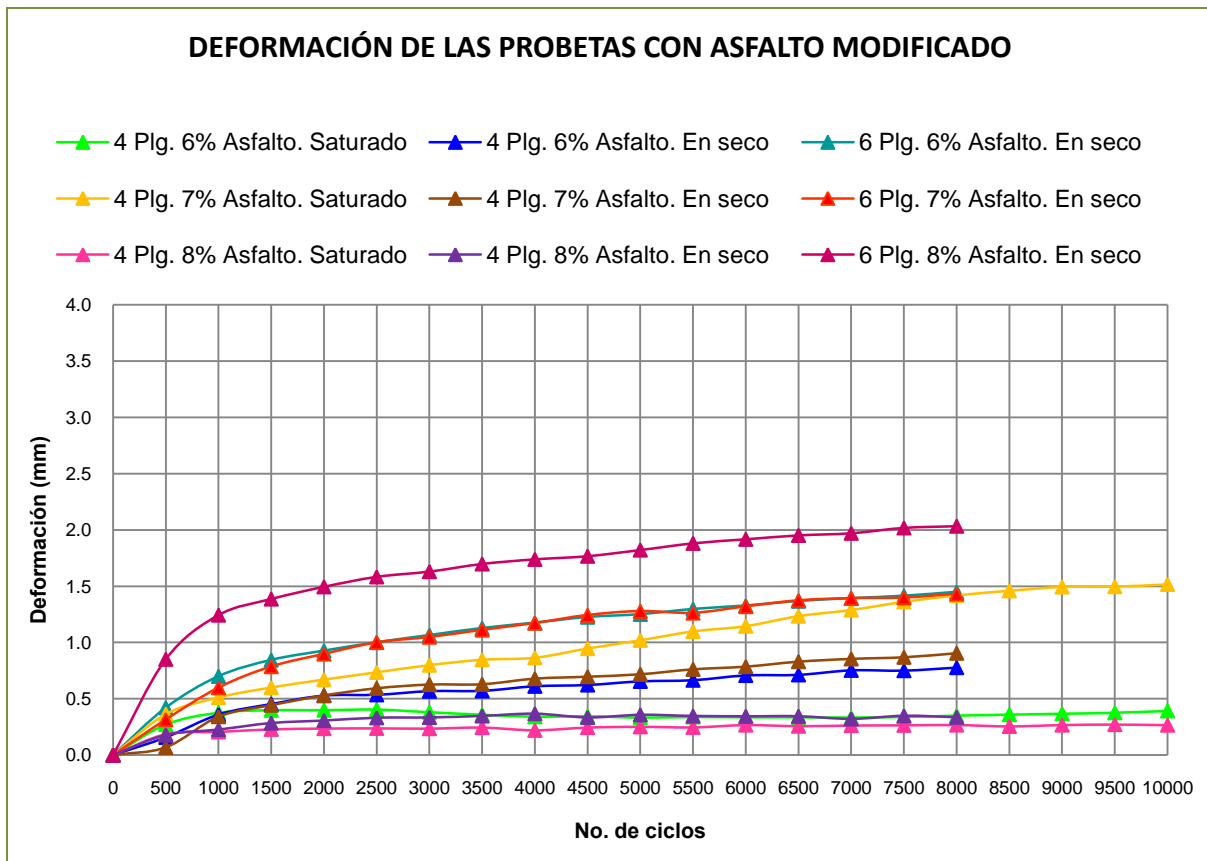


FIGURA 6.3.9
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS CON LAS PROBETAS DE 4” y 6”.
FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO MODIFICADO.
ENSAYADAS EN SECO Y SATURADAS EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA”.

En la Figura 6.3.9 se observa que respecto al 6% de asfalto las probetas que menos se deforman son las de 4” ensayadas en saturado, posteriormente las de 4” ensayadas en seco y finalmente las de 6” ensayadas en seco. Respecto al 7% de asfalto las probetas que menos se deforman son las de 4” ensayadas en seco, posteriormente las 6” ensayadas en seco y finalmente las de 4” ensayadas en saturado. Respecto al 7% de asfalto las probetas que menos se deforman son las de 4” ensayadas en saturado, posteriormente las de 4” ensayadas en seco y finalmente las de 6” ensayadas en seco.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.3.10 se muestran las deformaciones totales de las probetas de 4” y 6” ensayadas en seco y saturado, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca.

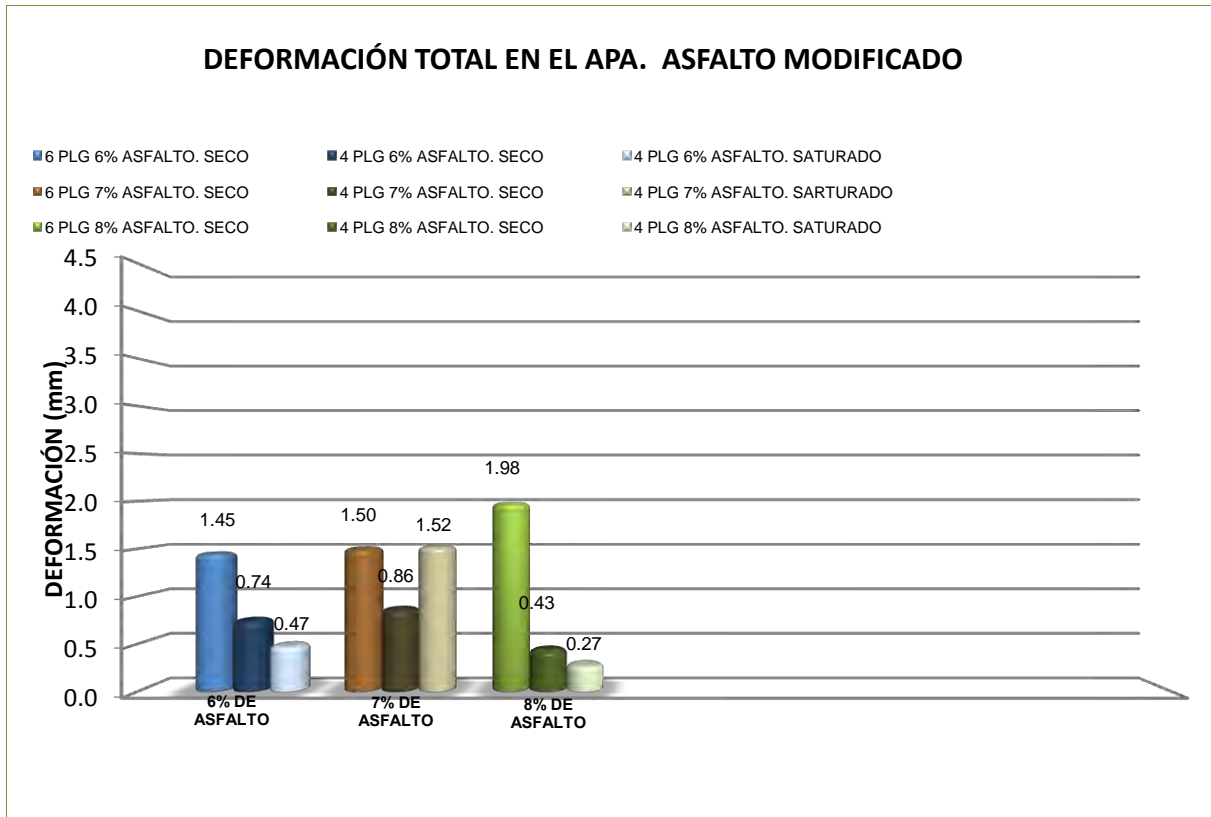


FIGURA 6.3.10
DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 4” Y 6”.
FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO MODIFICADO.
ENSAYADAS EN SECO Y SATURADAS EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA”.

En la Figura 6.3.10 se observa que en todos los casos las probetas fabricadas con el 6% y 8% de asfalto se deformaron fueron las de 6”, posteriormente las de 4” ensayadas en seco y finalmente las de 4” ensayadas en saturado; para las probetas fabricadas con el 7% de asfalto las que más se deformaron fueron las de 4” ensayadas en saturado, posteriormente las de 6” ensayadas en seco y finalmente las de 4” ensayadas en seco.

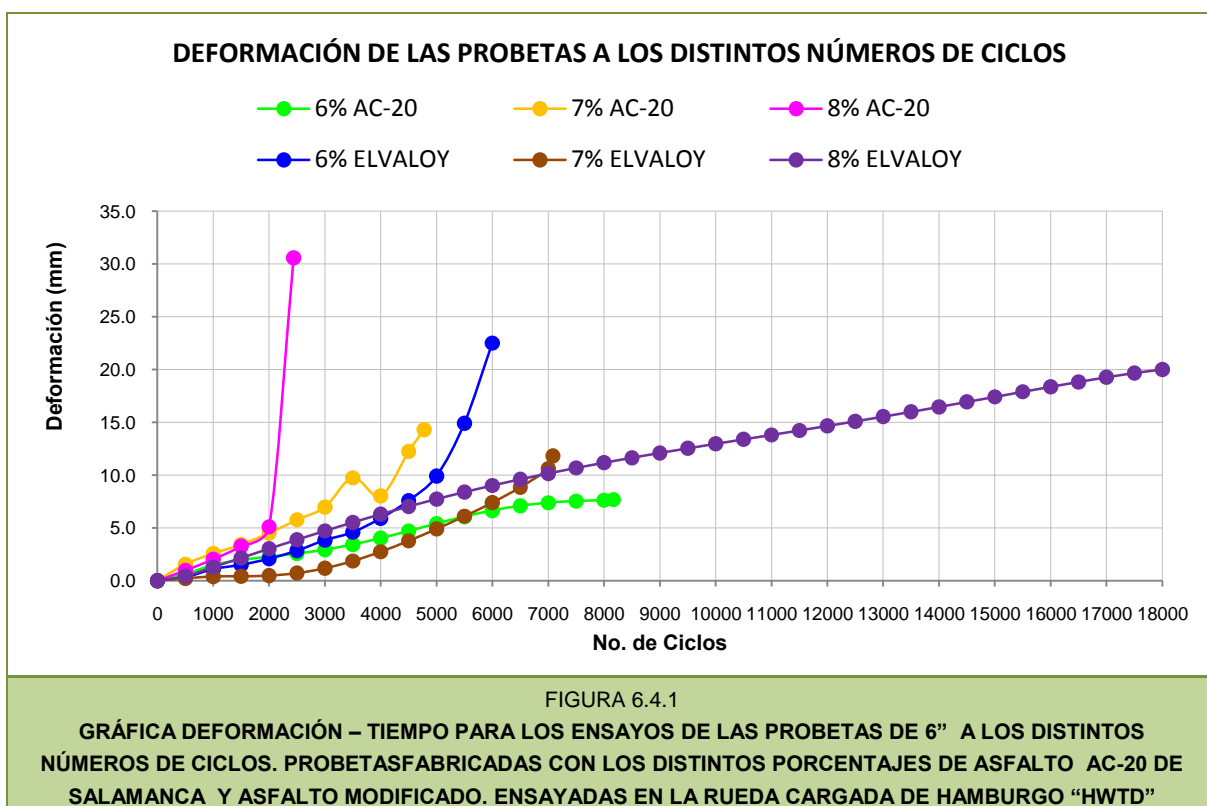
En el caso de las probetas de 4” y 6” ensayadas en seco, las que más se deformaron fueron las fabricadas con el 7%, posteriormente la del 8% y las menos deformadas fueron las del 6%. Para las probetas de 4” ensayadas en saturado las mas deformadas fueron las fabricadas con el 6% de asfalto, posteriormente las del 8% y finalmente las del 7%.



6.4 RUEDA CARGADA DE HAMBURGO “HWTD”

A continuación se muestra el resumen de los ensayos que se realizaron a cada uno de los diferentes ciclos. Como se mencionó en el Capítulo 5 algunos de los resultados obtenidos se descartaron debido a los problemas que se presentaron en las distintas pruebas, los resultados de los ensayos que no se descartaron, que contaban con el mismo porcentaje y tipo de asfalto fueron promediados.

En la Figura 6.4.1 se muestran los resultados de las pruebas de 6” elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto modificado. Donde se puede observar que las probetas elaboradas con asfalto AC-20 de Salamanca son las que se deformaron más.



Además se puede observar que las probetas fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca que menos se deformaron fueron las del 6%, posteriormente la del 7% y finalmente las del 8%. De las probetas fabricadas con asfalto modificado que menos se deformaron fueron las del 7%, posteriormente la del 8% y finalmente las del 6%.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.4.2 se muestran las deformaciones totales a los distintos números de ciclos de las probetas, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca y asfalto modificado.

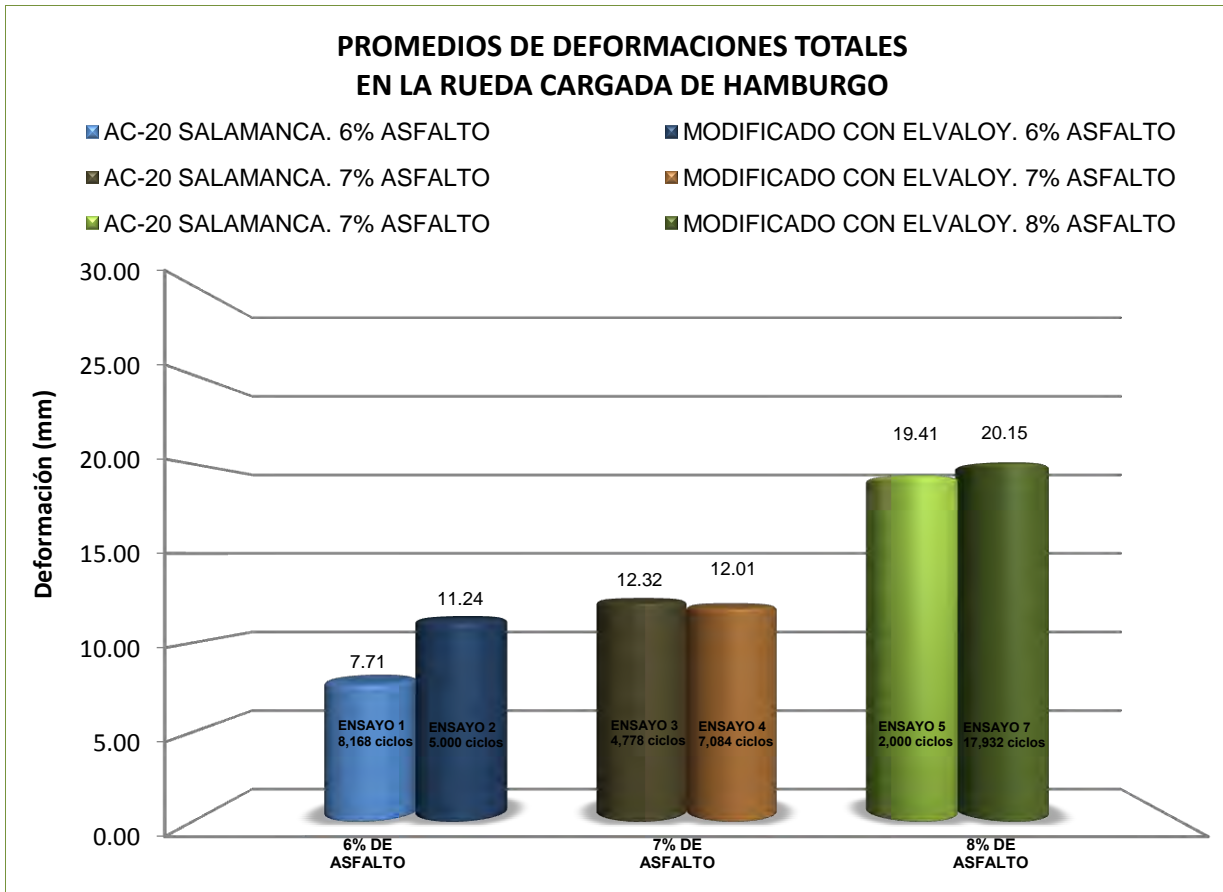


FIGURA 6.4.2

PROMEDIOS DE DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 6" A LOS DISTINTOS NÚMEROS DE CICLOS.
PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO
ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"

Debido a los distintos problemas presentados durante la realización de estos ensayos y a que éstos se realizaron a distintos números de ciclos, es difícil observar con claridad el comportamiento de todas las probetas.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

Debido a los distintos problemas que se presentaron durante la realización de los ensayos, las probetas fueron sometidas a un distinto número de ciclos, por lo que en la Figura 6.4.3 se mostrarán los resultados a los 4,778 ciclos, de las pruebas de 6" elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto modificado, esto se hizo con la finalidad de observar una tendencia de la mayoría de los ensayos realizados.

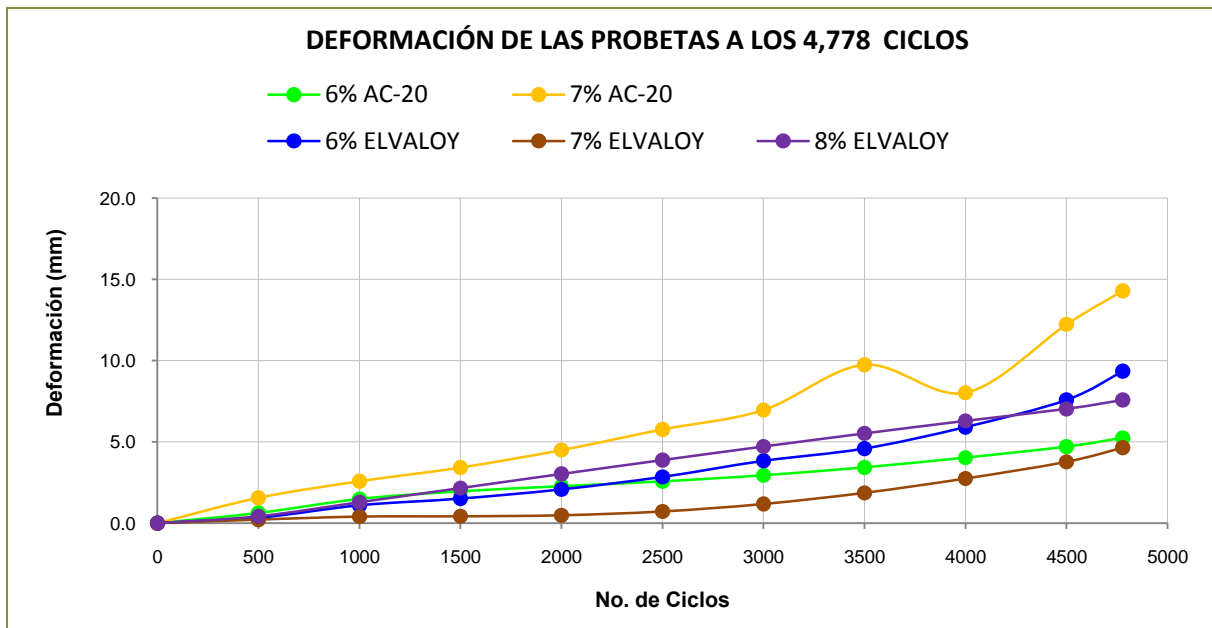


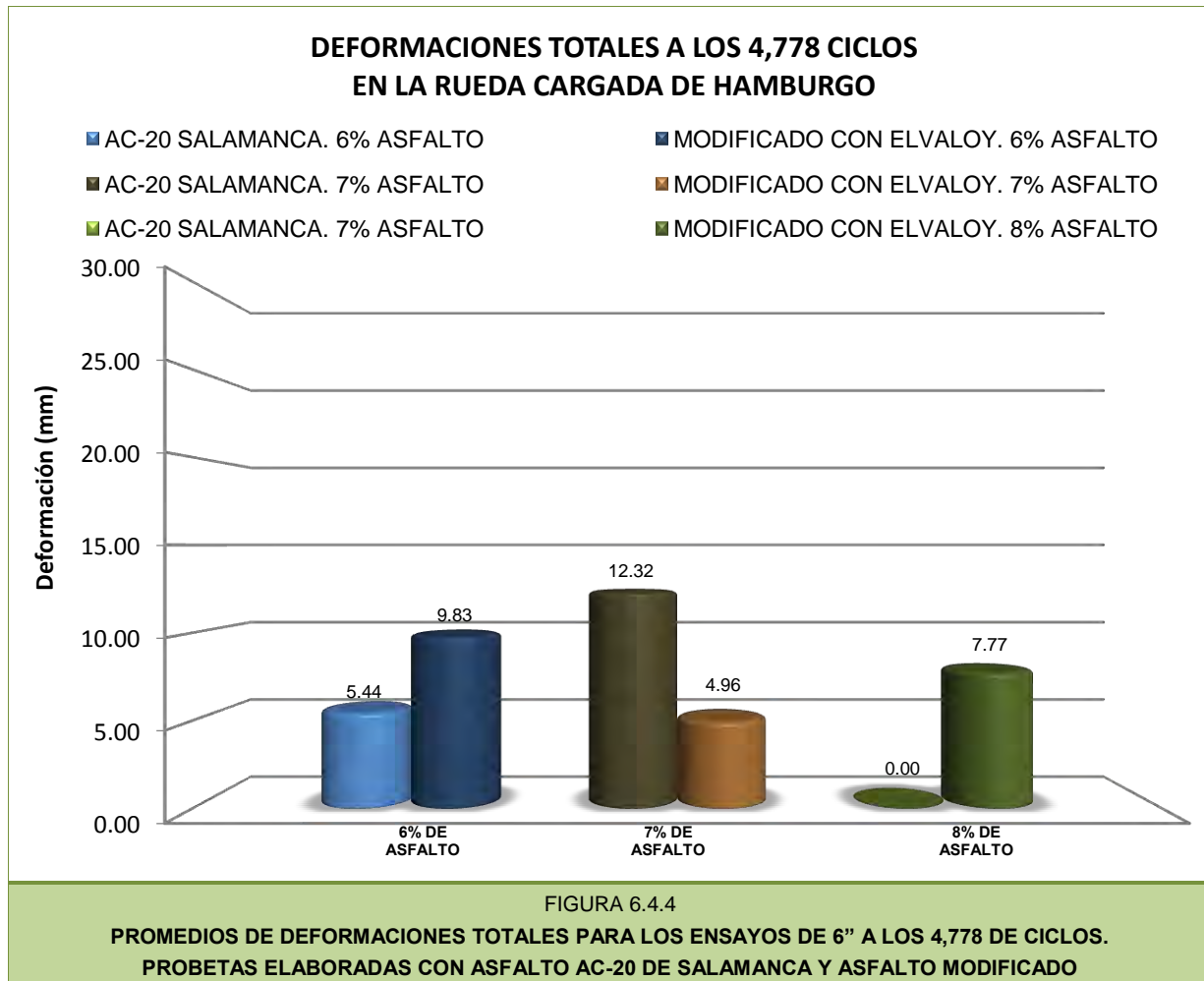
FIGURA 6.4.3
GRÁFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO PARA LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE 6". FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO. ENSAYADAS EN LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD" A LOS 4,778 CICLOS

Se puede observar que las probetas elaboradas con asfalto el 6% de asfalto modificado se deformaron más que las fabricadas con el 6% de AC-20 de Salamanca. Las probetas elaboradas con el 7% de asfalto con AC-20 de Salamanca se deformaron más que la fabricadas con el 7% de asfalto modificado. Como las probetas elaboradas con el 8% de asfalto AC-20 de Salamanca no se pudieron ensayar hasta los 4,778 ciclos, no podemos comparar los resultados se las probetas fabricadas con el 8% de asfalto modificado; sin embargo, se puede decir que se comportaron de manera similar a las fabricadas con el 6% de asfalto modificado y que además, se deformaron más que las fabricadas con el 8% de asfalto modificado.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.4.4 se muestran las deformaciones totales a los 4,778 ciclos de las probetas, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca y asfalto modificado.

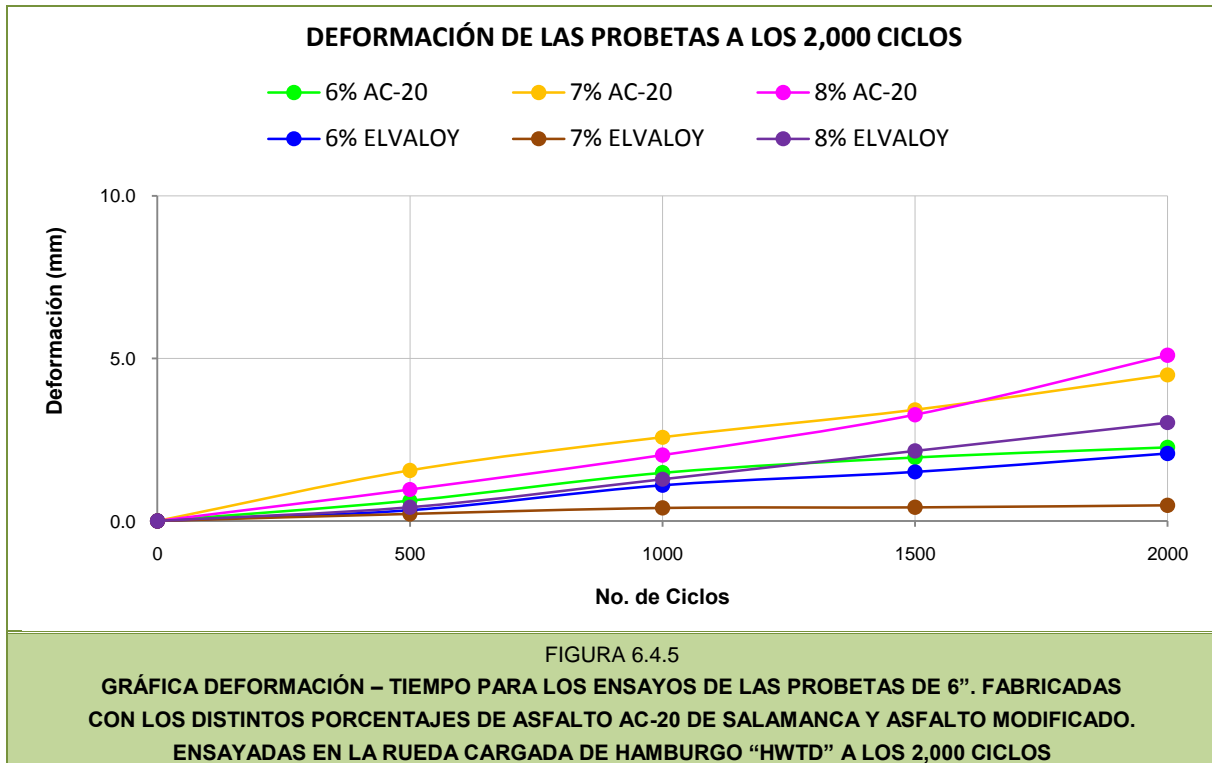


En la Figura 6.4.4 se observa que las probetas fabricadas con el 6% de asfalto AC-20 de Salamanca se deforman menos que las fabricadas con el 6% de asfalto modificado; lo cual es ilógico, debido a que se ha observado en los ensayos realizados en el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA” que el Terpolímero Elastomérico Reactivo mejora la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas. Las probetas fabricadas con el 7% de asfalto modificado se deforman un 60.5% menos que las fabricadas con el 7% de asfalto AC-20 de Salamanca. No es posible comparar las probetas fabricadas con el 8% de asfalto modificado con las elaboradas con el 8% de asfalto AC-20 de Salamanca.



Capítulo 6. Análisis de Resultados

Como en el ensayo 5 las probetas fueron sometidas a muy pocos ciclos y presentaron deformaciones muy grandes, en la Figura 6.4.5 se muestran los resultados los resultados a los 2,000 ciclos para poder observar la tendencia de todos los ensayos.



Se puede observar que las probetas elaboradas con asfalto el 6% de asfalto modificado se deformaron ligeramente más que las fabricadas con el 6% de AC-20 de Salamanca. Las probetas elaboradas con el 7% de asfalto modificado con AC-20 de Salamanca se deformaron más que la fabricadas con el 7% de asfalto modificado y de forma similar a las fabricadas con el 8% de asfalto AC-20 de Salamanca. Las probetas elaboradas con el 8% de asfalto con AC-20 de Salamanca se deformaron más que la fabricadas con el 8% de asfalto modificado.

En la Figura 6.4.2 se muestran las deformaciones totales a los distintos números de ciclos de las probetas de 6" elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto modificado.



Capítulo 6. *Análisis de Resultados*

En la Figura 6.4.6 se muestran las deformaciones totales a los 2,000 ciclos de las probetas, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca y asfalto modificado.

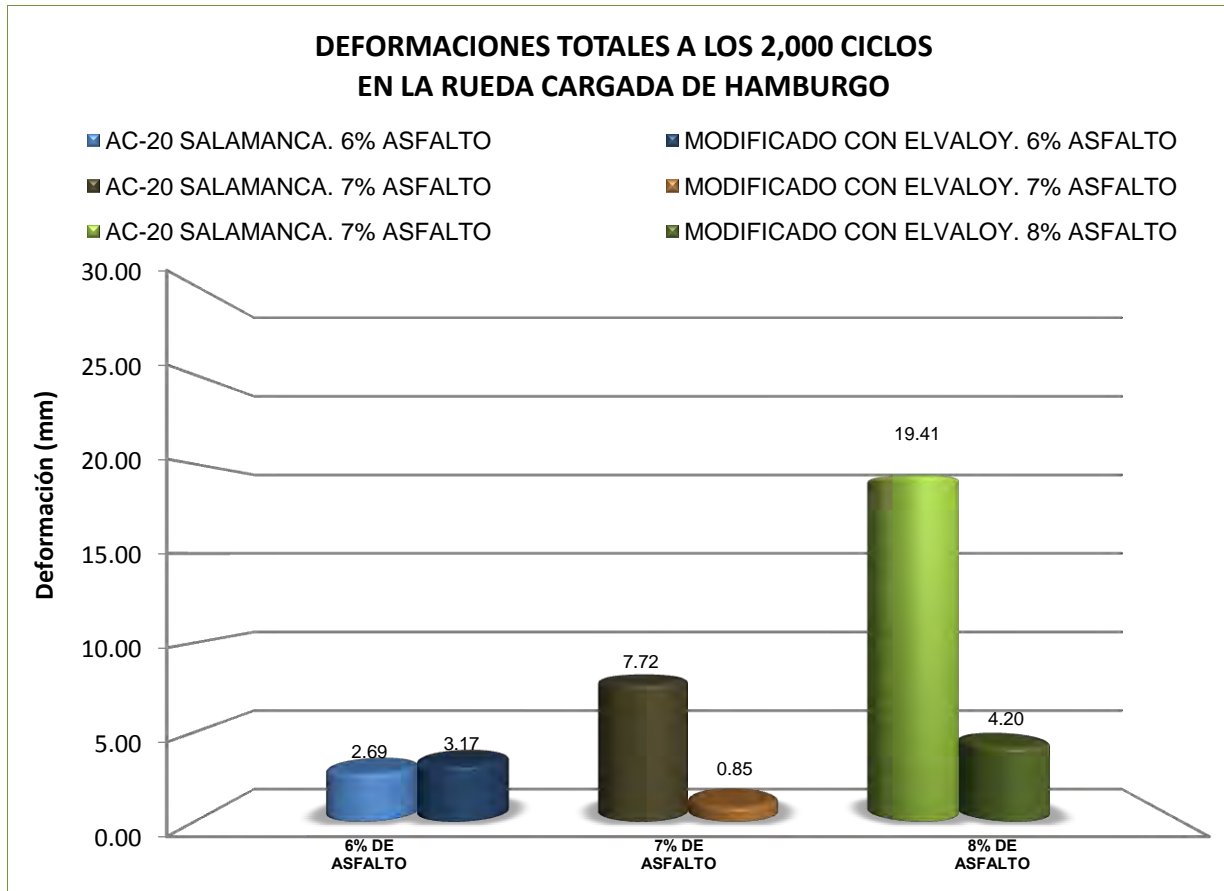


FIGURA 6.4.6

**PROMEDIOS DE DEFORMACIONES TOTALES PARA LOS ENSAYOS DE 6" A LOS 2,000 DE CICLOS.
PROBETAS ELABORADAS CON ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO MODIFICADO**

En la Figura 6.4.6 se sigue observando que a los 2,000 ciclos las probetas fabricadas con el 6% de asfalto AC-20 de Salamanca se deforman menos que las fabricadas con el 6% de asfalto modificado; Las probetas fabricadas con el 7% de asfalto modificado se deforman un 89.9% menos que las fabricadas con el 7% de asfalto AC-20 de Salamanca. Las probetas fabricadas con el 8% de asfalto modificado se deforman un 78.3% menos que las fabricadas con el 8% de asfalto AC-20 de Salamanca.



6.5 COMPARACIÓN DE LOS ENSAYOS

Para la comparación de los ensayos realizados en la Pista de ensayo de Laboratorio UMICH, el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA” y la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD” se decidieron realizar las siguientes graficas de Deformación – No. de ciclos, así como las de deformación total de la siguiente manera:

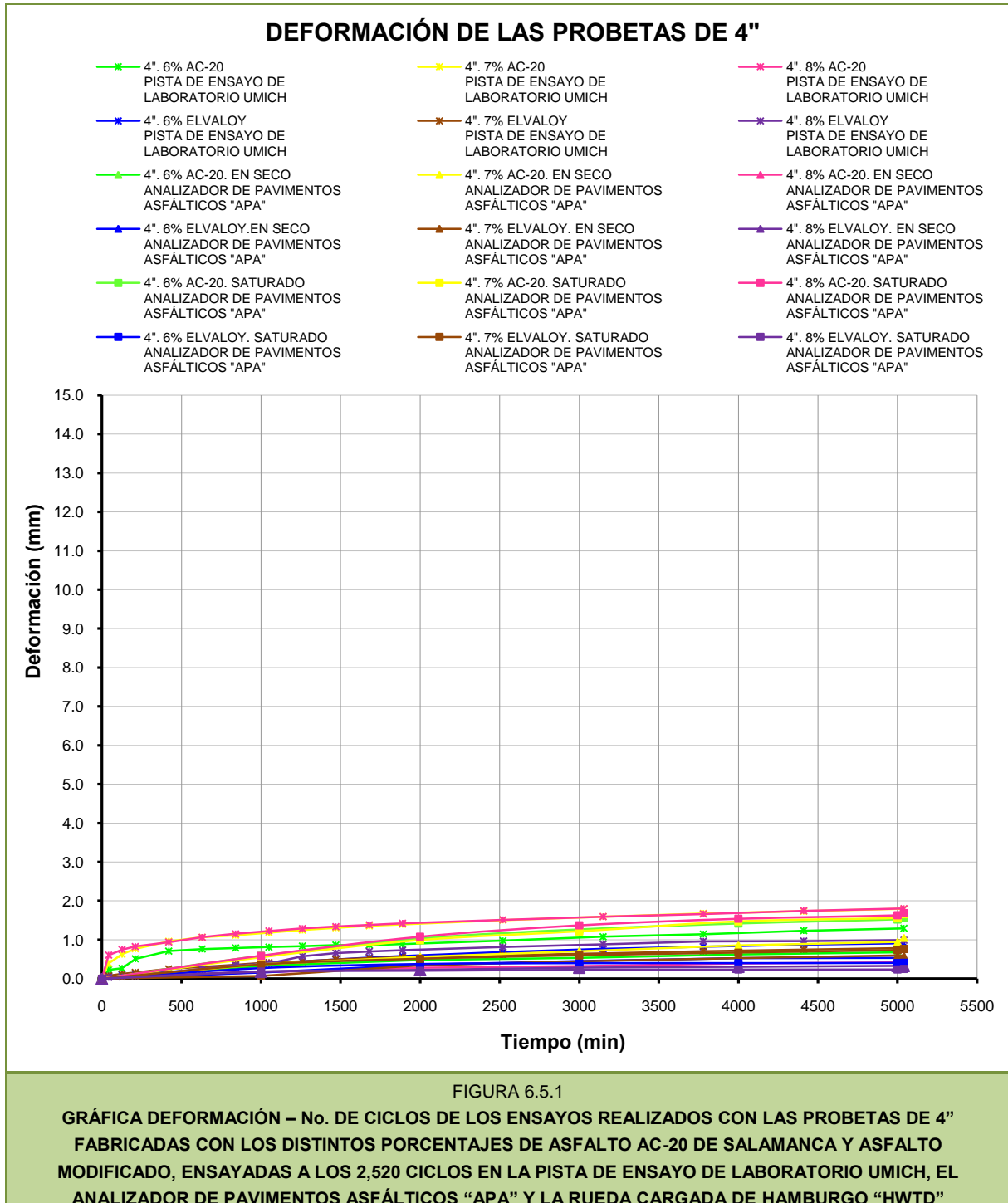
- Graficas de deformación de las probetas de 4” fabricadas con los 3 porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca y asfalto modificado. Ensayadas en seco y saturado.
- Graficas de deformación de las probetas de 6” fabricadas con los 3 porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca y asfalto modificado. Ensayadas en seco y saturado.
- Graficas de deformación de las probetas de de 4” y 6” fabricadas con los 3 porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca. Ensayadas en seco y saturado.
- Graficas de deformación de las probetas de 4” y 6” fabricadas con los 3 porcentajes de asfalto modificado. Ensayadas en seco y saturado.

Debido a que los ensayos en la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH, el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA” y la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD” se realizan a distintos números de ciclos de acuerdo a la norma de cada uno de los equipos, las gráficas de Deformación – No. de ciclos, así como las de deformación total se elaboraron a los 2,520 ciclos, ya que son el número de ciclos a los cuales se someten las probetas en la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH, ya que este equipo es el que somete a menor número de ciclos a las probetas.



Capítulo 6. *Análisis de Resultados*

En la Figura 6.5.1 se muestran los resultados de las pruebas de 4" en seco y saturado, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto modificado, ensayadas en los 3 equipos utilizados.





Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.5.2 se puede observar que las probetas que más se deformaron a los 2,520 ciclos fueron las fabricadas con el 7% y 8% de asfalto AC-20 de Salamanca, ensayadas en la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.





Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.5.3 se muestran los resultados de las pruebas de 6” en seco y saturado, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto utilizados tanto con asfalto AC-20 de Salamanca, como con Asfalto, ensayadas en los 3 equipos utilizados.

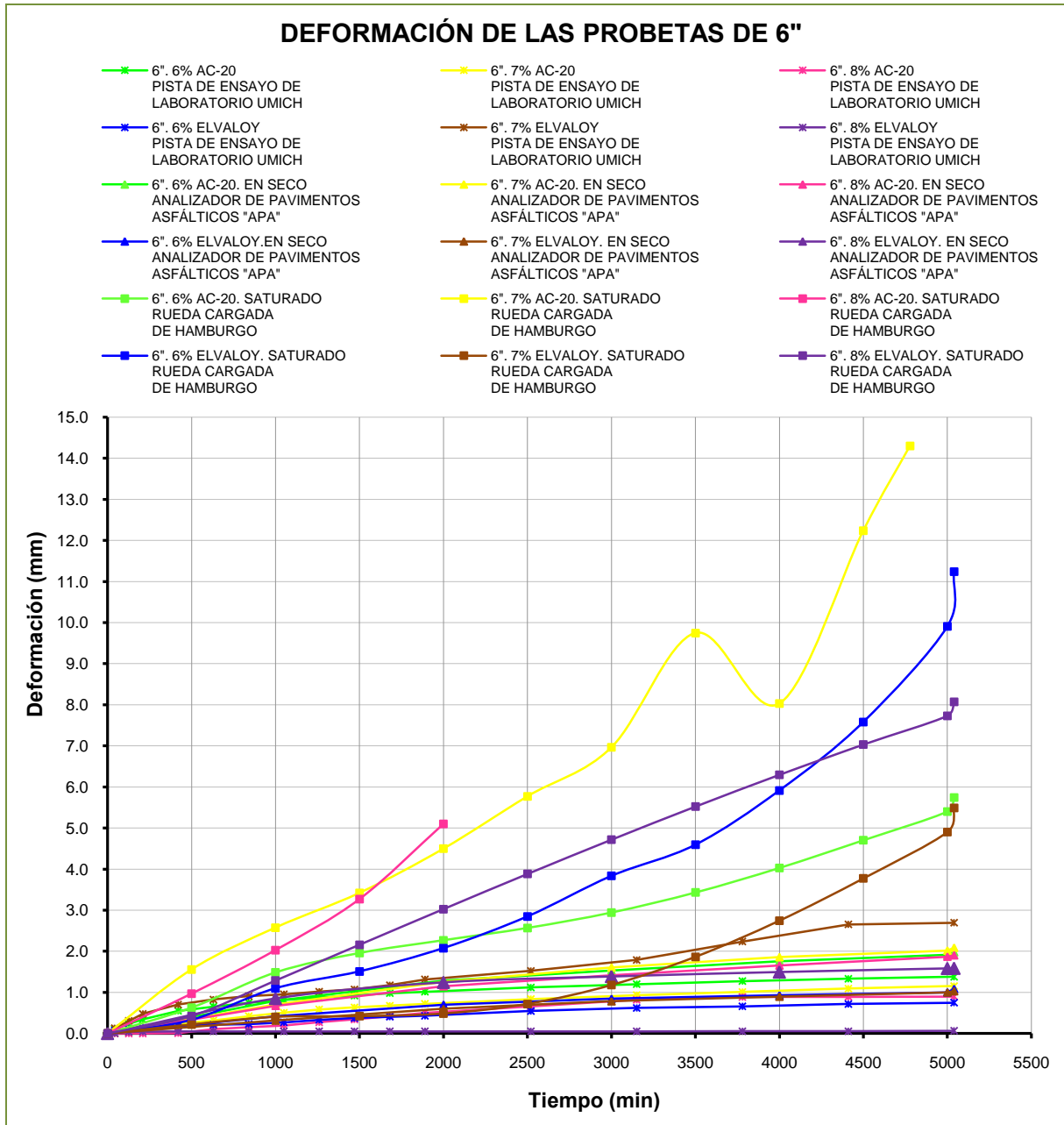


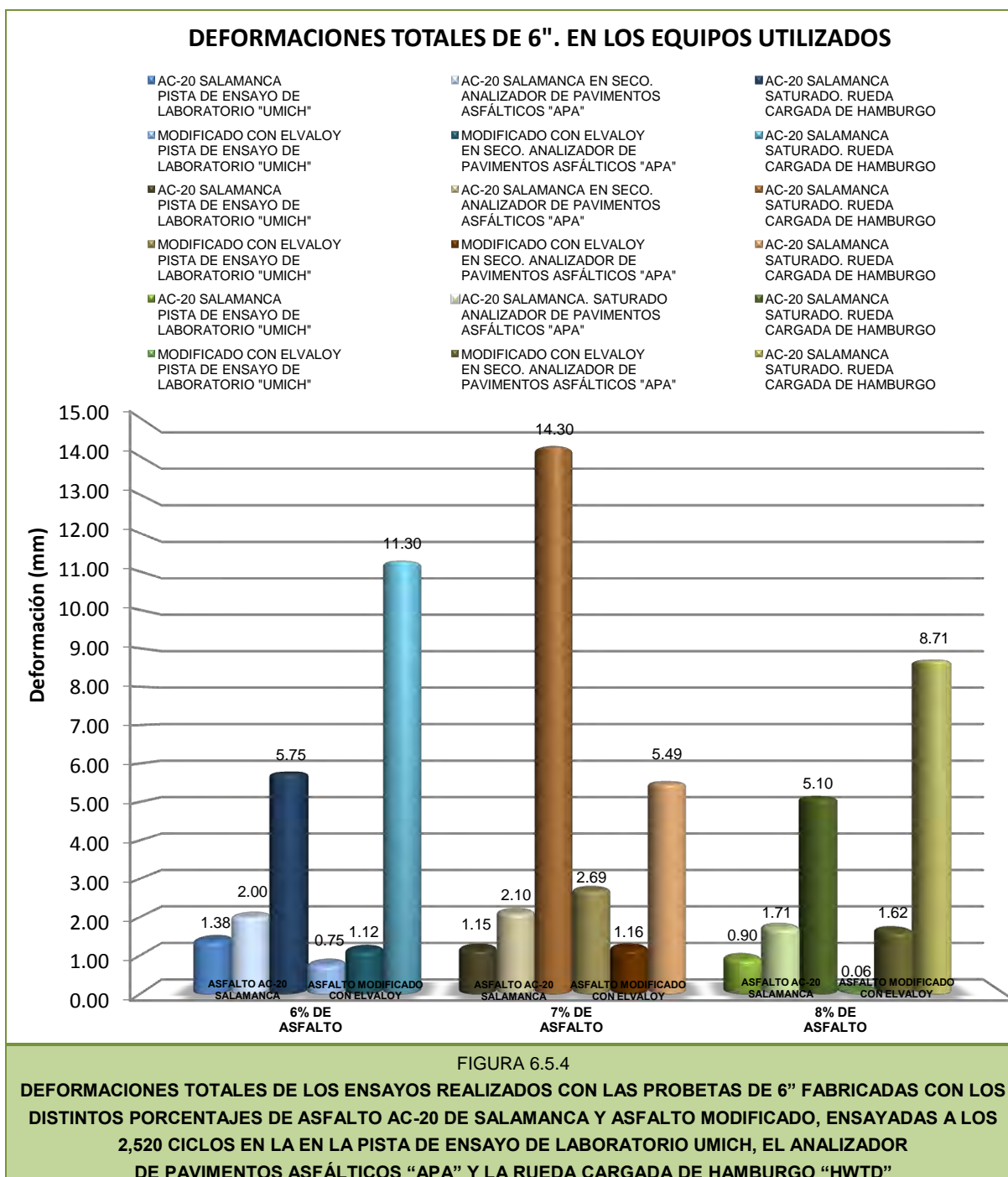
FIGURA 6.5.3

**GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 6”
FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA Y ASFALTO
MODIFICADO, ENSAYADAS A LOS 2,520 CICLOS EN LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH,
EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS “APA” Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO “HWTD”**



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.5.4 se puede observar que las probetas que más se deformaron a los 2,520 ciclos fueron las fabricadas con el 8% de asfalto, tanto de AC-20 de Salamanca, como las modificadas, ensayadas en la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”. Las probetas que menos se deformaron fueron las ensayadas en la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH.





Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.5.5 se muestran los resultados de las pruebas de 4" y 6" en seco y saturado, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto AC-20 de Salamanca, ensayadas en los 3 equipos utilizados.

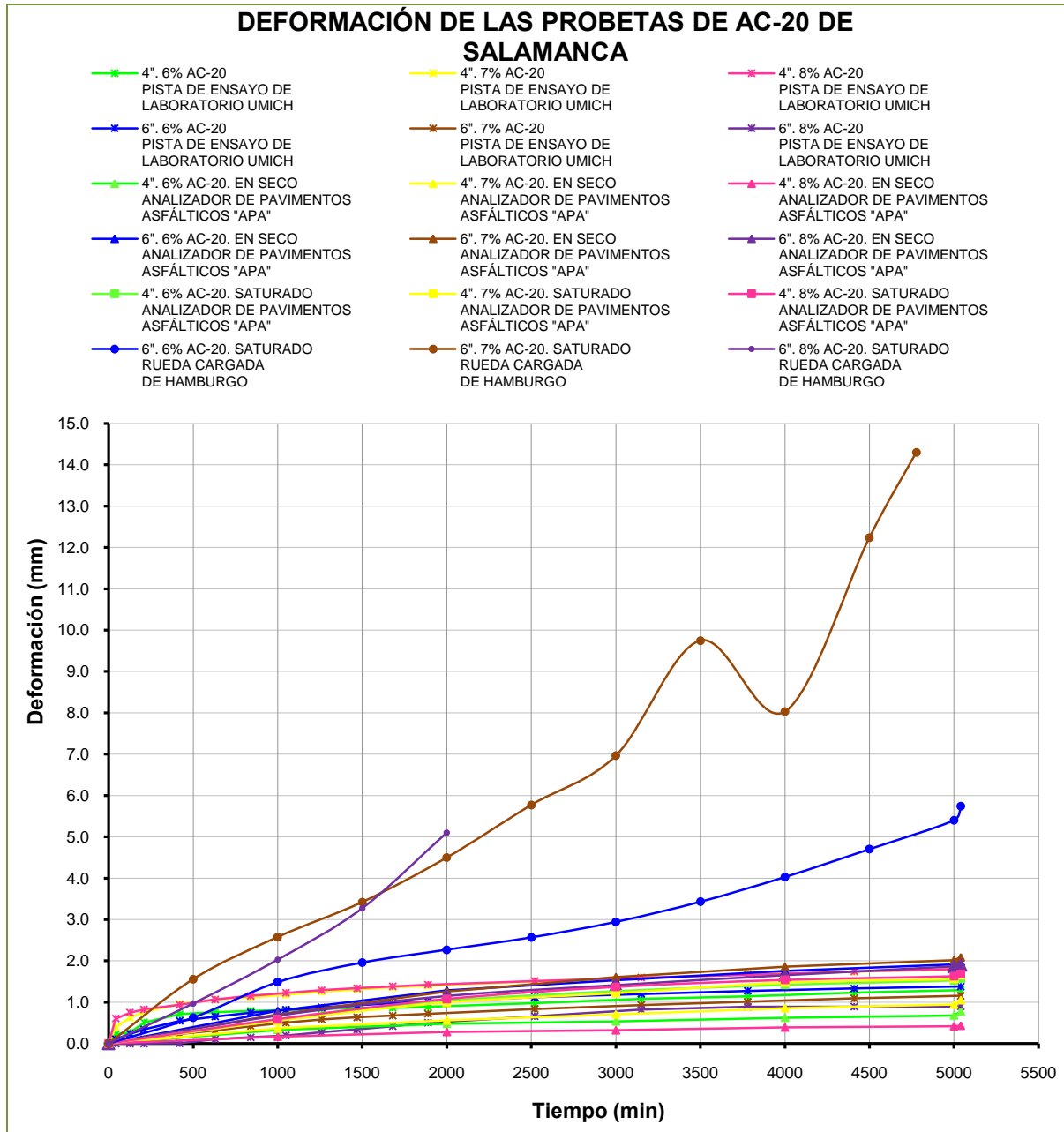
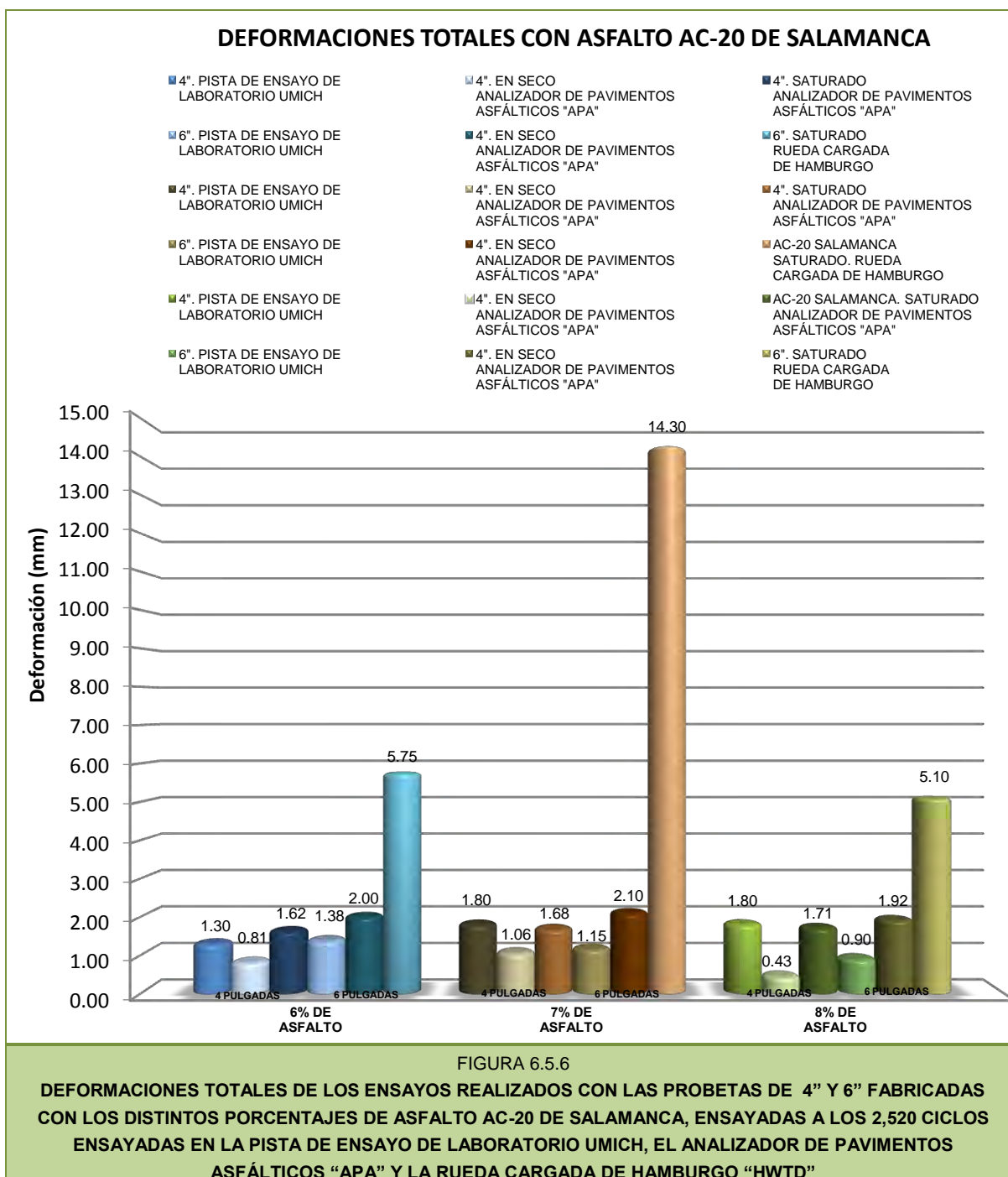


FIGURA 6.5.5
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 4" Y 6"
FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA,
ENSAYADAS A LOS 2,520 CICLOS EN LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH,
EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS "APA" Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.5.6 se puede observar que las probetas que más se deformaron a los 2,520 ciclos fueron las de 6” fabricadas con los 3 porcentajes de asfalto, ensayadas en la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”. Posteriormente las probetas de 4” fabricadas con los 3 porcentajes de asfalto ensayadas en el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA”.





Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.5.7 se muestran los resultados de las pruebas de 4" y 6" en seco y saturado, elaboradas con los 3 distintos porcentajes de asfalto modificado, ensayadas en los 3 equipos utilizados.

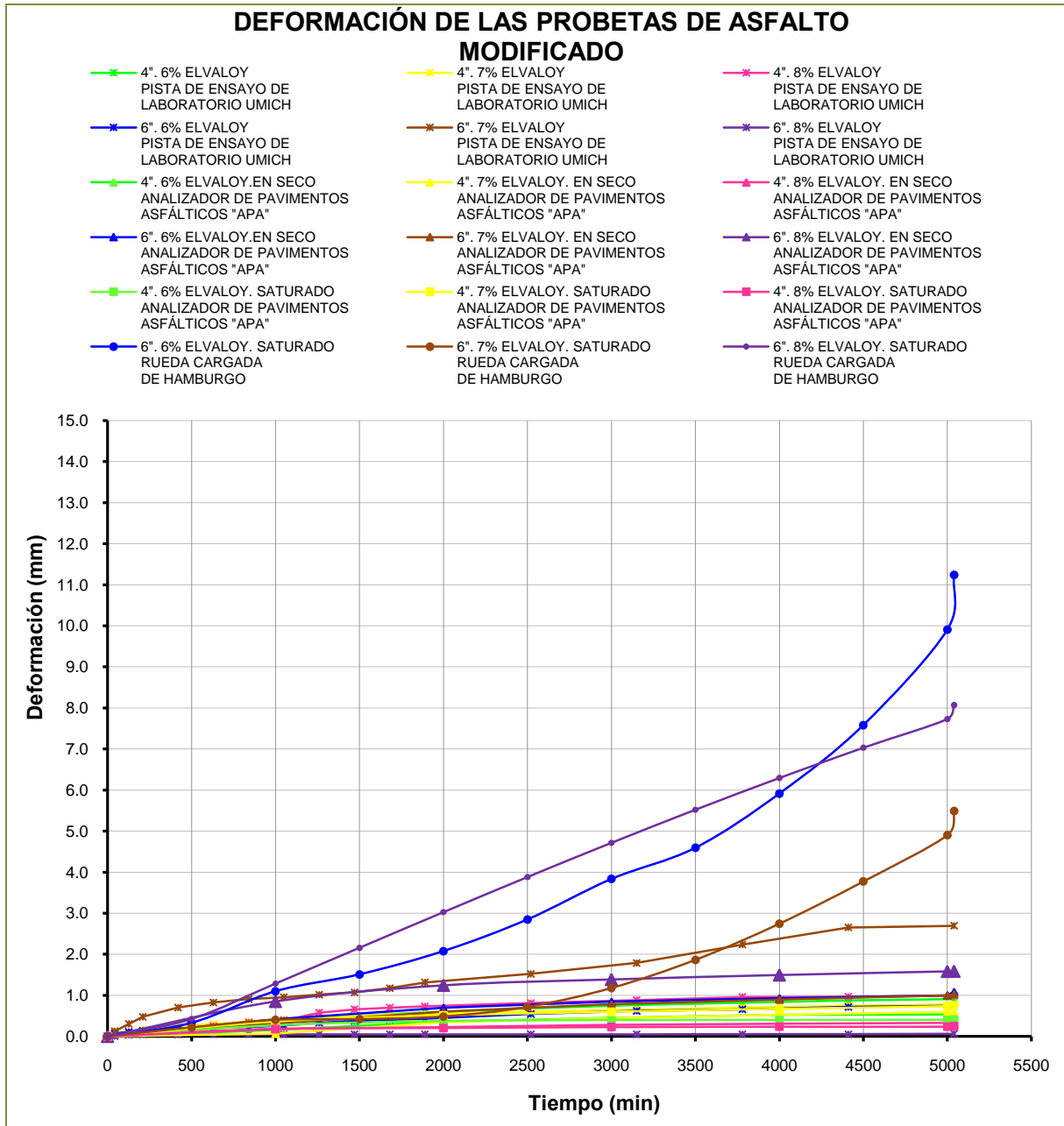
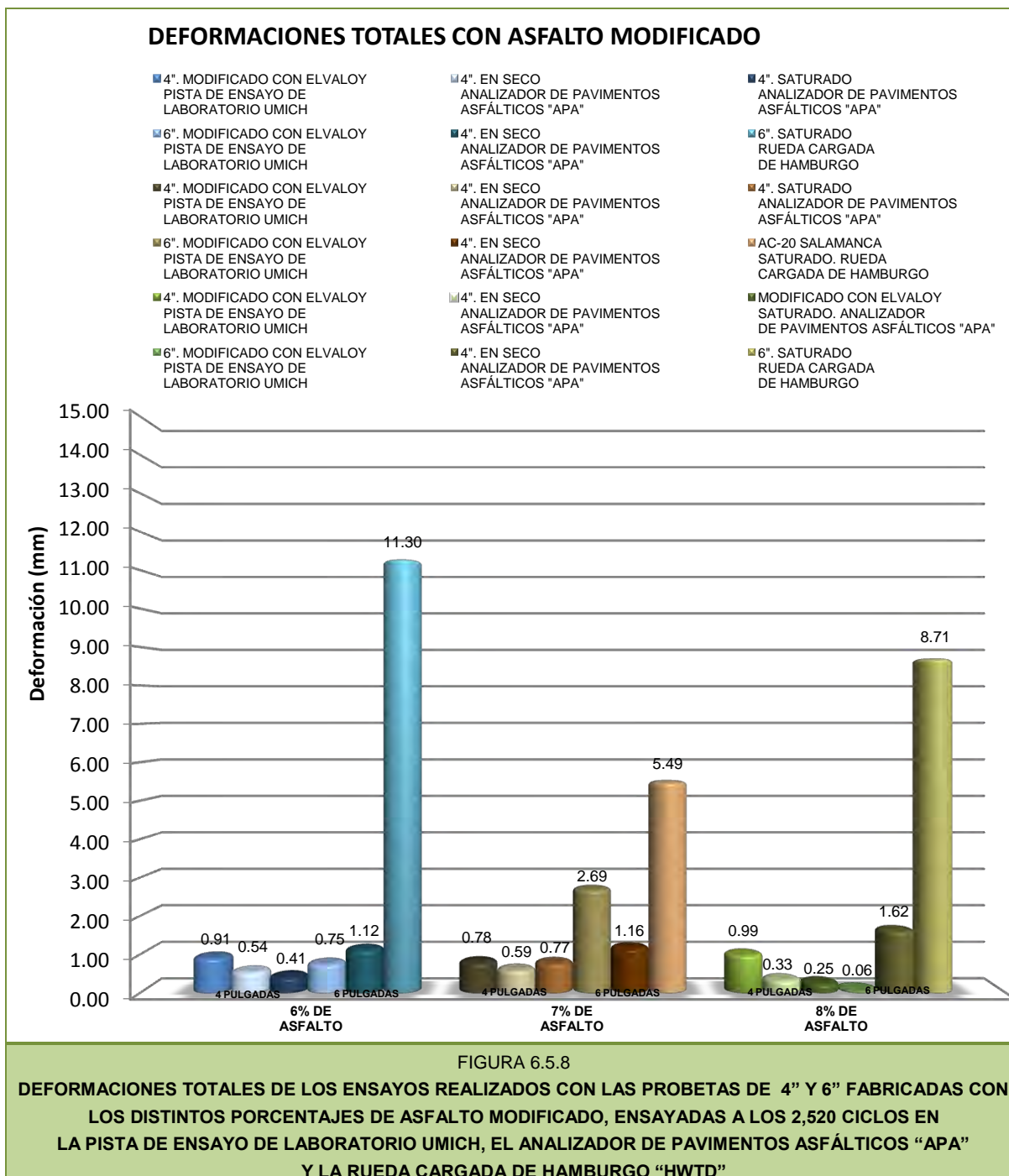


FIGURA 6.5.7
GRÁFICA DEFORMACIÓN – No. DE CICLOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON LAS PROBETAS DE 4" Y 6"
FABRICADAS CON LOS DISTINTOS PORCENTAJES DE ASFALTO AC-20 DE SALAMANCA, ENSAYADAS
A LOS 2,520 CICLOS EN LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO UMICH, EL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS "APA" Y LA RUEDA CARGADA DE HAMBURGO "HWTD"



Capítulo 6. Análisis de Resultados

En la Figura 6.5.6 se puede observar que las probetas que más se deformaron a los 2,520 ciclos fueron las de 6” fabricadas con los 3 porcentajes de asfalto, ensayadas en la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”. Posteriormente las probetas de 4” fabricadas con los 3 porcentajes de asfalto ensayadas en el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA”.





CONCLUSIONES

El crecimiento de un país está condicionado por una red de carreteras bien construidas y conservadas, ya que gracias a ellas se transportan los consumos, insumos y productos manufacturados indispensables para la vida, así como el traslado de pasajeros. Actualmente el nivel de servicio de nuestras carreteras ha disminuido, ya que sufren deterioros prematuros, además de que han superado su vida útil debido al crecimiento acelerado del peso y volumen del tránsito que circula por ellas.

El problema de la mayoría de las carreteras de nuestro país es que gran parte de ellas fueron construidas en las décadas de los años 40's y 50's y las especificaciones de los materiales eran diferentes a las actuales. Algunos de los tramos fueron construidos sobre suelos con materia orgánica, ya que eran tierras de cultivo y solo se tomaban prestamos laterales en los terraplenes; si a esto le agregamos que tanto el volumen del tránsito como la carga vehicular se han incrementado considerablemente a partir de esa época, es posible comprender porque muchas de nuestras carreteras cuentan con severos deterioros.

La gran mayoría de las carreteras en México están conformadas por pavimentos flexibles, donde uno de los problemas más importantes que presentan son las deformaciones permanentes en la mezcla asfáltica, por lo cual es de vital importancia analizar las causas de éste problema, logrando con ello diseñar mezclas asfálticas de mejor calidad; con lo que se



Conclusiones

podrá prevenir la aparición de las deformaciones permanentes, teniendo como consecuencia la reducción de los costos de operación vehicular, así como mejorar la seguridad de los usuarios.

La deformación permanente en los pavimentos asfálticos es uno de los principales problemas de seguridad del usuario, ya que al estar deformada la mezcla asfáltica permite que se aloje agua en los surcos que se han formado, ocasionando con ello el acuaplaneo de los vehículos, lo cual ocasiona el descontrol y problemas de amortiguamiento del vehículo, dejando de cumplir con su función de ser cómodos y seguros; además, se incrementan los tiempos de traslado, pues es necesario circular a una menor velocidad, reflejándose en los costos de los insumos afectando con ello a toda la población.

Si la estructura del pavimento se diseña y se le da un mantenimiento adecuado, es posible tener carreteras en buenas condiciones. Al presentarse las deformaciones permanentes en nuestras carreteras, se disminuye el nivel de servicio de las mismas, además de la seguridad de los usuarios. Por ello es necesario evitar que se presente este tipo de falla, por lo que la medición de las deformaciones permanentes es una ventaja en el comportamiento de los pavimentos y beneficia directamente la economía del país.

En distintos países se han realizado investigaciones acerca de los factores que influyen en la deformación permanente de las mezclas asfálticas, estos estudios han demostrado que los principales factores son: la magnitud y la frecuencia de aplicación de la carga, así como el efecto que tiene la temperatura en el pavimento; en lo que se refiere a los materiales empleados en la fabricación de la mezcla asfáltica los principales factores son: la granulometría y características del material pétreo, el tipo y contenido de ligante asfáltico, el contenido de vacíos de la mezcla, así como el control de calidad durante la construcción del pavimento.

Como ya se mencionó en el trabajo, en la deformación permanente de las mezclas asfálticas influyen varios aspectos, por lo tanto, el hecho de que la estructura del pavimento sea diseñada adecuadamente no garantiza que el pavimento no llegue a fallar; ya que, por



Conclusiones

ejemplo, el sobrepeso de los camiones de carga repercute directamente en el pavimento, por lo cual deben regularse adecuadamente las cargas del transporte.

México no cuenta con una metodología de diseño adecuada que pueda prevenir la aparición de las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas, por lo que es necesario contar con especificaciones, procedimientos, normas y equipos, que permitan prevenir su aparición y evaluar los tramos carreteros que ya presenten este problema.

En base a las investigaciones realizadas se observó que diversos países como España, Francia, Estados Unidos y Alemania, han desarrollado tecnologías de diseño con las cuales se pueden prevenir la aparición de las deformaciones permanentes; además, han desarrollado diversos equipos gracias a los cuales se ha podido observar que los ensayos de simulación pueden ayudar a prevenir de manera clara y significativa la aparición de las deformaciones permanente, a un menor costo que los tramos de prueba.

Es necesario contar con un mejor diseño de las mezclas asfálticas de manera que estas logren soportar el incremento de las cargas que se seguirán presentando tanto en nuestro país como en el resto del mundo, es allí donde radica la importancia de realizar ensayos de simulación que nos permitan observar de una forma más clara y precisa el comportamiento de las mezclas asfálticas.

Los equipos de simulación son vendidos a un alto costo, por lo cual resulta difícil adquirirlos en México, es por ello que en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo surge la idea de desarrollar un equipo para condiciones reales de México, que permita predecir la aparición de las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas.

Se logró diseñar, construir y poner a punto el prototipo denominado "Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH" para la evaluación de la resistencia a las deformaciones permanentes de mezclas asfálticas, con el que es posible simular el tráfico en las carreteras, construyéndose con un 10% del costo de un equipo comercial; con el cual se han realizado diversos ensayos para distintas investigaciones a un bajo costo.



Conclusiones

Durante la puesta a punto del prototipo “Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH” se presentaron una serie de complicaciones, estos problemas lograron solucionarse y el prototipo ha trabajado adecuadamente.

Se realizaron algunas modificaciones al prototipo, por lo cual en este momento es posible tomar las lecturas en el centro de las probetas y las lecturas ya no son tomadas en el punto de deformación máxima.

El prototipo fue desarrollado con fines de investigación y es posible realizar ensayos con probetas de distintas dimensiones, a diferentes temperaturas de ensayo y a distintas velocidades de circulación vehicular; con lo que se ha demostrado que en México se tiene la capacidad para desarrollar tecnología aplicada al diseño de pavimentos.

Para observar el comportamiento del prototipo “Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH”, se hizo una comparativa con otros equipos existentes en el país y se pudo observar que el prototipo es más confiable que los equipos comerciales, ya que si no se les da el mantenimiento adecuado y se realizan los ajustes necesarios se pueden presentar problemas, como los que se observaron en la Rueda Cargada de Hamburgo “HWT D”, donde las deformaciones reales eran diferentes a las que marcaba el sistema de adquisición de datos; es por ello que los equipos deben funcionar adecuadamente, dándoseles para ello un mantenimiento continuo.

Se observó que las condiciones de contorno influyen significativamente en la forma en como se presenta el deterioro de las muestras del pavimento, ya que se observó que al utilizar yeso de mala calidad en la Rueda Cargada de Hamburgo, las pastillas tenían un comportamiento diferente. Debe considerarse también la dosificación de agua-yeso.

Al realizar los ensayos en el prototipo “Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH” se pudo observar que las probetas fabricadas con asfalto modificado se deformaron entre un 30% y un 55% menos que las fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca.



Conclusiones

Al realizar los ensayos en el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA” se pudo observar que las probetas fabricadas con asfalto modificado se deformaron entre un 47% y un 75% menos que las fabricadas con asfalto AC-20 de Salamanca.

Las pruebas realizadas en la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD” tanto en Surfax S.A. de C.V. como en SEM Materias México fueron las menos representativas de todas ya que fueron las que más dispersiones presentaron debido a todos los problemas que se tuvieron tanto en la realización del ensayo, como en el proceso de la adquisición de datos, además de que los resultados obtenidos no correspondían a las deformaciones reales obtenidas, es por ello que no se puede observar una tendencia muy clara en dichos resultados.

En base a los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en los 3 equipos de simulación se pudo observar que al modificar un asfalto se pueden mejorar significativamente sus características de desempeño y en este caso en particular, el asfalto modificado presenta un mejor comportamiento a la deformación permanente de la mezcla asfáltica, con lo que se pueden obtener pavimentos asfálticos de mejor calidad.

Respecto a los métodos de ensayo se ha comprobado que si se realiza un ensayo en el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA” o en la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH, las mezclas tienen un comportamiento similar en cuanto a sus deformaciones permanentes, sin embargo si se analiza en la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD” es posible observar que se representa una condición crítica en la mezcla, ya que la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD” puede disgregar los materiales lo que ocasionaría un efecto diferente al que se está analizando y mas bien se relaciona con la afinidad asfalto-pétreo en presencia de agua.

Los resultados obtenidos de las pruebas no son suficientes para establecer alguna clase de correlación entre los 3 distintos equipos que existen en México para la determinación de las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Para ello será necesario elaborar más ensayos y variar los parámetros de los mismos.



Conclusiones

El hecho de que sea un equipo fabricado comercialmente no garantiza su óptimo funcionamiento, si no se le da el mantenimiento necesario. Los equipos caros y costosos también han presentado problemas, presentan muchas dispersiones en los datos dados, el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA” registraba distintas temperaturas durante el ensayo, sobre todo en saturado y era difícil comprobar la temperatura del agua manualmente con un termómetro, ya que si se abría la cámara se relajan los pistones y se bajaba la caja que contenía el agua.

En base a los ensayos realizados en los distintos equipos, se pudo observar que la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH resultó ser el equipo más sencillo y económico para la realización de los ensayos de deformación permanente en mezclas asfálticas, además de que es posible variar distintos parámetros para evaluar este factor.

Además, se debe tomar en cuenta que los equipos son delicados, por lo cual deben ser manejados por personas capacitadas y con un método de ensayo totalmente definido, en cuanto a la preparación de la muestra, los tiempos de calentamiento, etc; para con ello lograr obtener resultados confiables.



RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

RECOMENDACIONES PARA MEJORAR EL EQUIPO

La pista de Ensayo de Laboratorio UMICH puede ser mejorada si se colocaran unos LVDT'S y las lecturas se hicieran al centro de cada pastilla.

RECOMENDACIONES SOBRE LA NORMATIVA MEXICANA

Es indispensable contar con una Normativa Mexicana, donde se tomen en cuenta las condiciones climáticas del País, las pendientes gobernadoras de nuestras carreteras y los ligantes asfálticos con los que se cuentan; ya que las distintas normativas de los equipos que existen en México para evaluar la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas manejan condiciones específicas del lugar donde fueron creados.

México cuenta con una gran variedad de climas, esta condición repercute en el ensayo, ya que no se presentan las mismas condiciones en el sur del país donde existe tendencia a climas húmedos, en el centro con climas templados y al norte con climas fríos; por lo que es necesario desarrollar especificaciones de comportamiento de la mezclas asfáltica en cuanto



Recomendaciones y futuras Líneas de Investigación

a deformaciones permanentes se refiere, realizando una zonificación en base a los asfaltos y climas existentes en el país, para con ello definir los rangos de valores de deformación que serán aplicables a México.

Debido a que el sobrepeso de los camiones que circulan en México repercute directamente en las deformaciones permanentes de las mezclas asfálticas, es de vital importancia que se aplique la Norma de pesos y dimensiones de los vehículos.

RECOMENDACIONES SOBRE LOS EQUIPOS A UTILIZAR

Aunque actualmente en México se realizan ensayos con la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH, el Analizador de Pavimentos Asfálticos “APA y la Rueda Cargada de Hamburgo “HWTD”, no se cuenta con una normativa que nos indique las deformaciones máximas que se puede presentar en las mezclas asfálticas; por esta razón es de vital importancia realizar ensayos mediante una normativa mexicana, que defina un tipo de equipo a utilizar o en su defecto establezca una correlación para los 3 equipos.

Si se decidiera optar por incluir en una norma mexicana cualquiera de los 3 equipos de simulación con los que cuenta el país para determinar la deformación permanente en mezclas asfálticas, sería importante estandarizar el proceso de ensayo, ya que aunque existe un método de ensayo para cada equipo, las dimensiones de las probetas son distintas, además de analizar si existe alguna correlación entre las dimensiones de éstas y el proceso de compactación.

Es necesario controlar adecuadamente el proceso de compactación, ya que por medio de ella se puede reducir la susceptibilidad a la deformación permanente. Se debe verificar el porcentaje de vacíos de la mezcla, considerando un contenido óptimo de asfalto, si se cuenta con un porcentaje de vacíos menor al 3% aumentará la posibilidad de que se presente un



Recomendaciones y futuras Líneas de Investigación

ahuellamiento prematuro, ya que durante el tránsito de los vehículos éste porcentaje de vacíos disminuirá.

Durante la realización de los ensayos se debe cuidar el procedimiento, la calibración y mantenimiento del equipo, para que se puedan obtener lecturas confiables.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Determinar si los resultados obtenidos de ensayos realizados en laboratorio corresponden a resultados obtenidos en campo, mediante la realización de ensayos con corazones extraídos en un tramo de prueba, analizándolos en la Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH y fabricando pastillas en laboratorio con las mismas características volumétricas.

Calibrar los equipos para las condiciones de cargas y temperaturas en México y desarrollar las especificaciones de cada ensayo para las condiciones reales de México.

Realizar ensayos para definir el comportamiento de las mezclas en base a las distintas temperaturas que se tienen en el país, para con ello obtener los valores que dan problemas en nuestras carreteras y poder realizar un esquema regionalizado.



Referencias Bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Reyes L. Fredy A., Madrid A. María F., Salas C. Sandra J. (2007), “Mezclas Asfálticas Modificadas con un elastómero – caucho y un plastómero (tiras de bolas de leche con asfalto 80-100). Bogotá, Colombia.
- [2]. Centeno Ortiz Mauricio, Cremades Ibáñez Ignacio (2007, XIV CILA, La Habana, Cuba). “Evaluación de las Deformaciones Plásticas de Diferentes Asfaltos mediante la Máquina de Pista. Guadalajara, México.
- [3]. Francesio A. Carlos (2007, XIV CILA, La Habana, Cuba), “Ahuellamiento Prematuro de los Pavimentos Asfálticos”. Buenos Aires. Argentina.
- [4]. Angeole Silvia, Martínez Fernando, Santamaría Enrique, Gavián Emiliano, Cahuapé Marina (2006), “Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas”.
- [5]. Reyes Ortiz Oscar J., Reyes Lizcano Fredy A., Troncoso Rivera Juan R. (2006), “Efecto de la Presión de contacto y la temperatura en el Ahuellamiento de un mezcla asfáltica”. Revista de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.



Referencias Bibliográficas

- [6]. Dávila M. Juan M. (2005), “Análisis comparativo de Módulo Resiliente y ensayos de deformación permanente de mezclas asfálticas del tipo (MDC2) en briquetas compactadas con Martillo Marshall y Compactador Giratorio”. Tesis de Ingeniería Civil. Bogota Colombia.
- [7]. Agnusdei Jorge, losco Omar, Jair Mario, Morea Francisco. (2005 XIII CILA, San José, Costa Rica.), “Correlación entre ensayos que miden deformaciones bajo tránsito en mezclas asfálticas”, Buenos Aires, Argentina.
- [8]. Vásquez R Marcos Vinicio. (2005). “Diseño de Mezclas asfálticas en caliente – Nuevas Tendencias”. San Salvador, El Salvador.
- [9]. Caro Spinel Silvia, Coral Triviño Leonardo, Caicedo Hormaza Bernardo (2005). “Modelación del Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas de Pavimentos”. Revista Ingeniería de la Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- [10]. Hanson Douglas, Arnold Terry, Johnson Andrew (2005). “Estudio del Diseño de Mezcla Asfáltica en Caliente en la Carretera Panamericana de San Ramón – Barranca Costa Rica. Alabama, United States.
- [11]. Miro R., Pérez Jiménez F. Olivier M., Moutier F. (2005). “Evaluación de la Resistencia a las Deformaciones Plásticas de Mezclas formuladas a partir de Normativa Española y Francesa.
- [12]. Saura López Francisco Javier, Crespo del Río Ramón (2004) “La auscultación de firmes y la seguridad vial”. Madrid, España.
- [13]. Wahr Daniel Carlos (2004) “Introducción deterioros / fallas”. Valparaiso, Chile.
- [14]. Padilla Rodríguez Alejandro (2004), “Análisis de la Resistencia a las Deformaciones Plásticas de las Mezclas Bituminosas Densas de la Normativa Mexicana Mediante el Ensayo de Máquina de Pista”.



Referencias Bibliográficas

- [15]. ASOPAC, Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia (2004) "Cartilla del Pavimento Asfáltico". Bogotá, Colombia.
- [16]. Garnica Anguas P., Correa A., (2004) "Conceptos Mecanicistas en Pavimentos. (Publicación Técnica No. 258, IMT)". Sanfandila, Querétaro, México.
- [17]. Garnica Anguas P., Delgado Alamilla H. Gómez López J. A., (2004) "Análisis de la Influencia del Método de Compactación en el Comportamiento Mecánico de Mezclas Asfálticas. (Publicación Técnica No. 255, IMT)". Sanfandila, Querétaro, México.
- [18]. Garnica Anguas P., Delgado Alamilla H. Gómez López J. A., Alonso Romero S., Alarcón Orta H. A., (2004) "Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas. (Publicación Técnica No. 246, IMT)". Sanfandila, Querétaro, México.
- [19]. Uzarowski Ludomir, Paradis Michel, Lum Paul (2004), "Accelerated Performance testing Of Canadian Asphalt Mixes Usin Three Different Wheel Rut Testers". Paper prepared for presentation At the Accelerated Field and Laboratory Pavement Testing Session Of the 2004 Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Quebec, Canada.
- [20]. Kraemer Carlos, Pardillo José M., Rocci Sandro, Romana Manuel G., Sánchez Victor, Del Val Miguel A. (2004), "Ingeniería de Carreteras. Volumen II". Mac Graw Hill. Madrid, España.
- [21]. Cortés Bautista Delia Deyanira (2004), "Rehabilitación del tramo Villa Madero – Carácuaro del Km 40+000 al 53+000, mediante la técnica de reciclado de pavimentos en frío con cemento". Morelia, Michoacán, México.
- [22]. Torrejón O. Julio (2003), "Asfalto: un Material con Múltiples Aplicaciones", Revista Bit. Chile, Chile.



Referencias Bibliográficas

- [23]. Sanabria Grajales Luis Enrique (2003), "Adición de Carbón Mineral Modificado como Agente Mejorador de las Propiedades de los Asfaltos Colombianos", Bucaramanga, Colombia.
- [24]. Botasso, Balige, Mikelaites, Bisio, González y Rebollo (2003), "Nueva metodología para la valoración de la adherencia árido ligante", Buenos Aires, Argentina.
- [25]. John S., Miller and William Y., Bellinger (2003), "Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (Fourth Revised Edition)".
- [26]. Ebensperger M. Luis (2003), "Los Áridos en la Construcción". Revista Bit.
- [27]. Ordóñez Huamán Abel, Minaya Gozález Silene (2003) "Aproximación al conocimiento SUPERPAVE". Perú.
- [28]. Garnica Anguas P., Gómez López J. A., Delgado Alamilla H., (2003) "Algunos Aspectos de la Densificación de Mezclas con el Compactador Giratorio. (Publicación Técnica No. 228, IMT)". Sanfandila, Querétaro, México.
- [29]. Rico R. Alfonso, Del Castillo Hermilo, (2003) "Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas. Volumen 2". Editorial Limusa, decimosexta reimpresión. México, D.F.
- [30]. Cabrera T. Cristian, Lucero Robinson, Molina L. Moisés, (2002) "Evaluación del Ahuellamiento con equipo de alto rendimiento". Chile, Chile.
- [31]. Thenoux Z. Guillermo, Carrillo O. Héctor, (2002), "Análisis de casos de ahuellamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas". Chile.
- [32]. Carswell J., Cruz F. (2002). "Misión y Ventajas de los betunes Modificados con Polímeros". España.



Referencias Bibliográficas

- [33]. Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica (2002) "M5.1. Catálogo de Deterioros de Pavimentos Flexibles".
- [34]. Garnica Anguas P., Gómez López J. A., Sesma Martínez J. A. (2002) "Mecánica de Materiales para Pavimentos. (Publicación Técnica No. 197, IMT)". Sanfandila, Querétaro, México.
- [35]. Brown, E. Ray, P.S. Kandhal, Jingna Zhang (2001). "Performance Testing Hot Mix Asphalt. NCAT Report No 01-05 A" Auburn, Alabama.
- [36]. Fonseca Rodríguez C. H. (2000), "En busca de una transferencia tecnológica ordenada en el área de pavimentos asfálticos en México", Monterrey, México.
- [37]. Coronado I. Jorge, Consejo Sectorial de Ministros de Transporte de Centro América, Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2000) "Manual Centroamericano de Mantenimiento de carreteras". Guatemala, Guatemala.
- [38]. Corro Caballero Santiago, Prado Ollervides Guillermo (1999), "Diseño estructural de Pavimentos Asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones. Manual del DISPAV-5, versión 2.0", México, México.
- [39]. Pérez Jiménez F.E., Miró Recansens R. (1999). "Curso sobre Mezclas Asfálticas Bituminosas. Barcelona, España.
- [40]. Rico Rodríguez A., Téllez Gutiérrez R., Garnica Anguas P., (1998) "Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodologías de Diseño y Tendencias. (Publicación Técnica No. 104, IMT)". Sanfandila, Querétaro, México.
- [41]. Crespo del Río Ramón, AEPO S.A. Ingenieros Consultores. (1998) "Introducción a la Auscultación de Firmes". Madrid, España.



Referencias Bibliográficas

- [42]. López Jimeno Carlos (1994). "Manual de Áridos. Prospección, explotación y Aplicaciones". Ed. LOEMCO. E.T.S de Ingenieros de Minas de Madrid. Madrid, España.
- [43]. Asphalt Institute, (1992). "Construcción. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente". Serie de Manuales No. 22.
- [44]. Brown E. R., Cross Stephen A. (1989). "A Study of in-place Rutting of Asphalt Pavements", Auburn University, Alabama, E.E.U.U.A.
- [45]. Desarrollo e Implementación de un equipo de Medición de Ahuellamiento en pavimentos de Concreto Asfáltico.
- [46]. Asphalt Institute. "SUPERPAVE. Antecedentes de los Métodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos de SUPERPAVE".
- [47]. Asphalt Institute. "SUPERPAVE. Antecedentes del Diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas de SUPERPAVE".
- [48]. "Manual de instrucciones para microordenador basado en un indicador de control digital"
- [49]. Norma Española NLT – 173 / 00. "Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio". Ensayos de Carreteras. CEDEX.
- [50]. AASHTO T 324-04. Standard Method of Test for "Hamburg Wheel – Track Testing of Compacted Hot – Mix Asphalt (HMA)".
- [51]. AASHTO TP 63-071. Standard Method of Test for "Determining Rutting Susceptibility of Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA)".



Referencias Bibliográficas

NORMATIVA DE LA SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

- [52]. NORMA N·CMT·4·05·001/06 “Calidad de Materiales Asfálticos”.
- [53]. NORMA N·CMT·4·05·002/06 “Calidad de Materiales Asfálticos Modificados”.
- [54]. NORMA N·CMT·4·05·003/08 “Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras”.
- [55]. NORMA N·CMT·4·05·004/08 “Calidad de Materiales Asfálticos Grado PG”.
- [56]. NORMA M·MMP·4·04·002/02 “Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”.
- [57]. NORMA M·MMP·4·04·003/02 “Densidad Relativa de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”.
- [58]. NORMA M·MMP·4·04·004/02 “Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”.
- [59]. NORMA M·MMP·4·04·005/08 “Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”.
- [60]. NORMA M·MMP·4·04·006/02 “Desgaste Mediante la Prueba de Los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”.
- [61]. NORMA M·MMP·4·04·008/03 “Intemperismo Acelerado de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas”.
- [62]. NORMA M·MMP·4·05·002/02 “Viscosidad Dinámica de Cementos y Residuos Asfálticos”.



Referencias Bibliográficas

- [63]. NORMA M-MMP-4-05-003/02 “Viscosidad Cinemática de Cementos Asfálticos”.
- [64]. NORMA M-MMP-4-05-004/00 “Viscosidad Saybolt – Furol en Materiales Asfálticos”.
- [65]. NORMA M-MMP-4-05-005/02 “Viscosidad Rotacional Brookfield de Cementos Asfálticos”.
- [66]. NORMA M-MMP-4-05-006/00 “Penetración en Cementos y Residuos Asfálticos”.
- [67]. NORMA M-MMP-4-05-007/00 “Punto de Inflamación Cleveland en Cementos Asfálticos”.
- [68]. NORMA M-MMP-4-05-008/00 “Solubilidad de Cementos y Residuos Asfálticos”.
- [69]. NORMA M-MMP-4-05-009/00 “Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos”.
- [70]. NORMA M-MMP-4-05-010/02 “Pruebas en el Residuo de la Película Delgada de Cementos Asfálticos”.
- [71]. NORMA M-MMP-4-05-011/07 “Ductilidad de Cementos y Residuos Asfálticos”.



Referencias Bibliográficas

PÁGINAS WEB CONSULTADAS

- [72]. Federal Highway Administration <www.fhwa.dot.gov>.
- [73]. Laboratorio Central de Puentes y Carreteras "LCPC". <www.lcpc.fr>.
- [74]. TRANSFERENCIA, Revista digital de Posgrado, Investigación y Extensión del Campus Monterrey, <www.mty.itesm.mx/die/ddre>.
- [75]. Universidad Católica de Valparaíso, <www.icc.ucv.cl>.
- [76]. Instituto de desarrollo Urbano, <www.idu.gov.co>.
- [77]. Revista Técnica de la Construcción, <www.revistabit.cl>.
- [78]. e-asfalto, El site de asfaltos en Internet, <www.e-asfalto.com>.
- [79]. Comisión permanente del asfalto, <www.cpasfalto.org>.
- [80]. Instituto Tecnológico de la Paz <www.itlp.edi.mx>.
- [81]. Petrobras Energía S. A., <www.petrobras.com.ar>.
- [82]. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata <www.frlp.utn.edu.ar>.
- [83]. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Consejo Nacional de Vialidad del Gobierno de Costa Rica <www.mopt.go.cr>.
- [84]. Normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes <www.normas.imt.mx>.
- [85]. Troxler International Ltd., <www.troxlerlabs.com>.



ANEXOS

Como parte de los Anexos se incluirán de forma completa las Normas y métodos de ensayo que se utilizaron para la realización de cada uno de los ensayos de este trabajo, las cuales son:

- **NLT-173/00.** “Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio”.
- **AASHTO TP 63-07.** “Standard Method of Test for Determining Rutting Susceptibility of Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA)”.
- **AASHTO TP 324-04.** “Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted. Hot-Mix Asphalt (HMA)”.

Además se incluirán los planos completos con las dimensiones del Prototipo “Pista de Ensayo de Laboratorio UMICH, como son:

- Vista frontal, lateral y en planta de la cámara termostática.
- Vista frontal, lateral y en planta del carro de desplazamiento.



NLT – 173/00

Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio

1 OBJETO, FUNDAMENTO Y CAMPO DE APLICACIÓN

1.1 Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla bituminosa, tanto en el caso de proyecto de mezclas en el laboratorio como en el de testigos procedentes de firmes.

1.2 El ensayo consiste en someter una probeta de la mezcla bituminosa (nota 1), al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida.

1.3 Este procedimiento es aplicable principalmente a las mezclas bituminosas fabricadas en caliente y destinadas a trabajar en condiciones severas de tráfico y clima, aunque variando las condiciones del ensayo puede también ser de utilidad en otros tipos de mezclas.

Nota 1. Los moldes y las probetas que se detallan en esta norma son de forma prismática, aunque el procedimiento general de ensayo puede tener aplicación a probetas de otras formas, siempre que se satisfagan convenientemente algunos requisitos como tamaño mínimo, fijación, etc.

2 APARATOS Y MATERIAL NECESARIOS

2.1 Conjunto de compactación. Está formado por el molde, el collarín y los cuatro angulares,

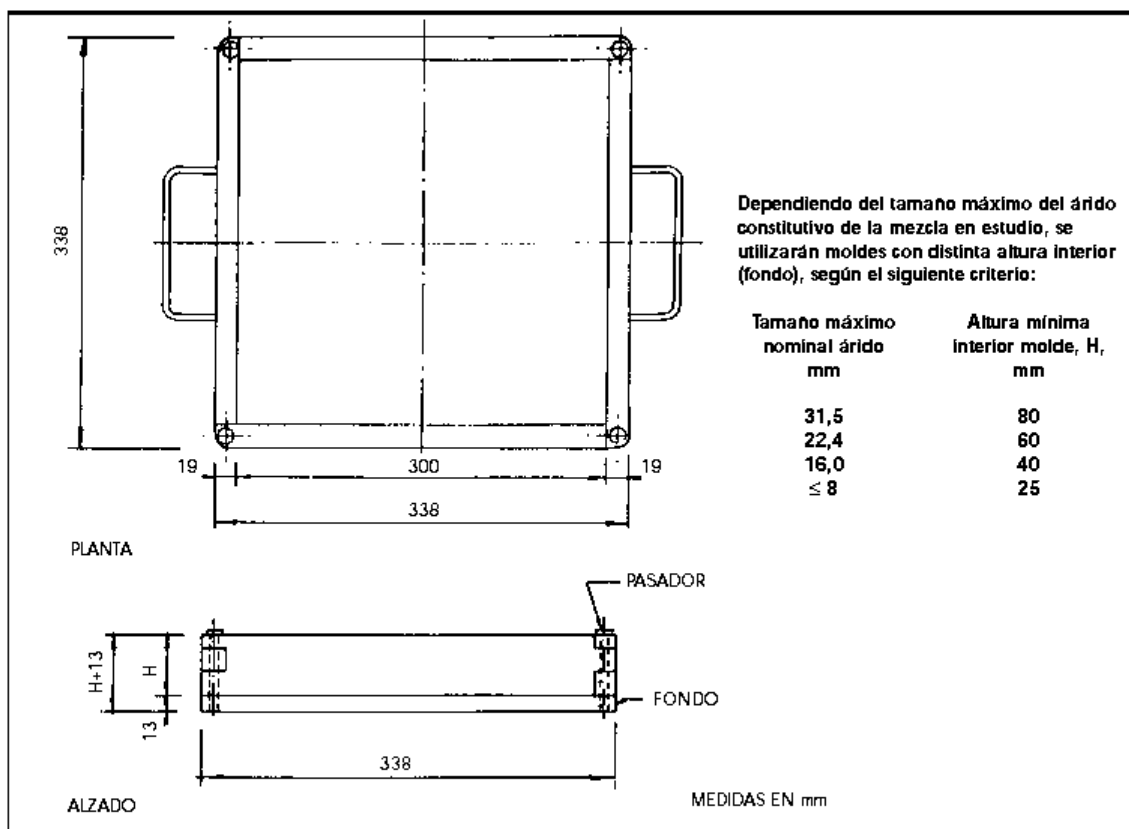


FIGURA 1. Molde.



Anexos

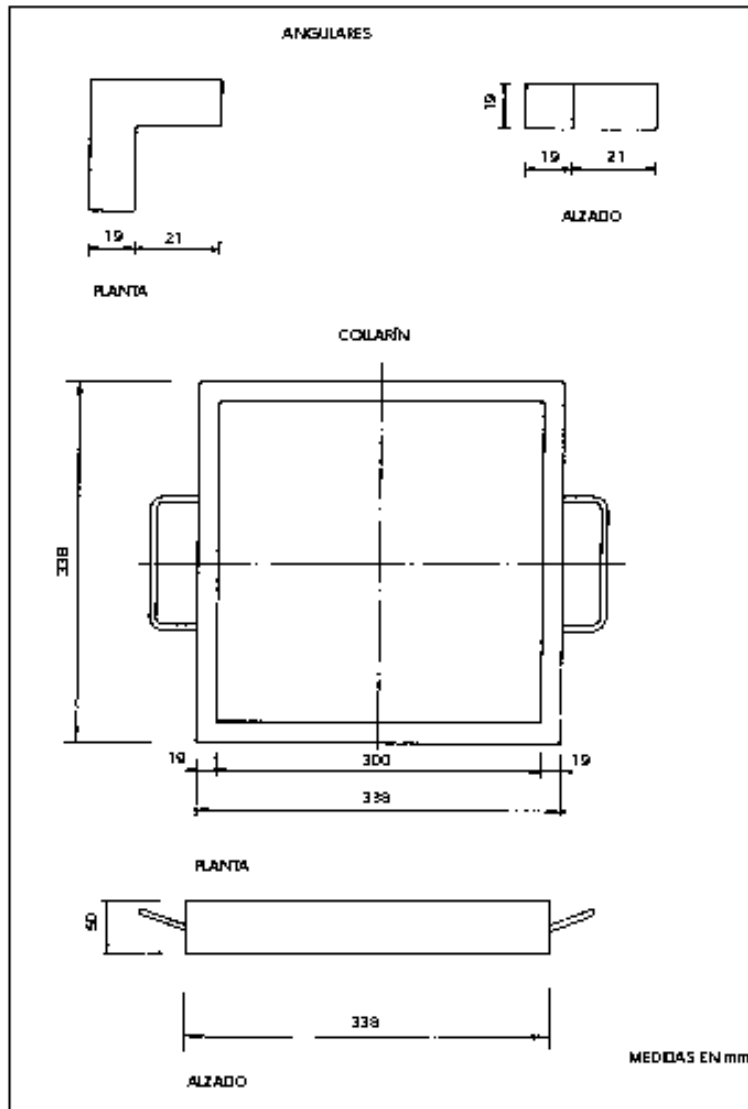


FIGURA 2. Angulares y collarín.

construidos en acero y con la forma y dimensiones que se detallan en las figuras 1 y 2.

2.2 Base de compactación. Esta base está formada por una pieza prismática de hormigón de (60 x 60 x 20) cm como mínimo, apoyada en una de sus caras mayores sobre un dispositivo de anclaje con amortiguación. Su forma y dimensiones están indicadas en la figura 3.

2.3 Elemento compactador. La compactación de la mezcla dentro de los moldes se realiza mediante una placa de acero sobre la que van montados dos vibradores iguales, cuyas excéntricas, de 9,5 kg de masa y girando a la velocidad de unos 314 rad/s (3.000 rpm), proporcionen en cada uno una fuerza centrífuga de 3 kN, (300 kgf), y dispuestos ambos de forma que sus excéntricas giren hacia el centro de la placa. Su forma y dimensiones se indican en la figura 4.



Anexos

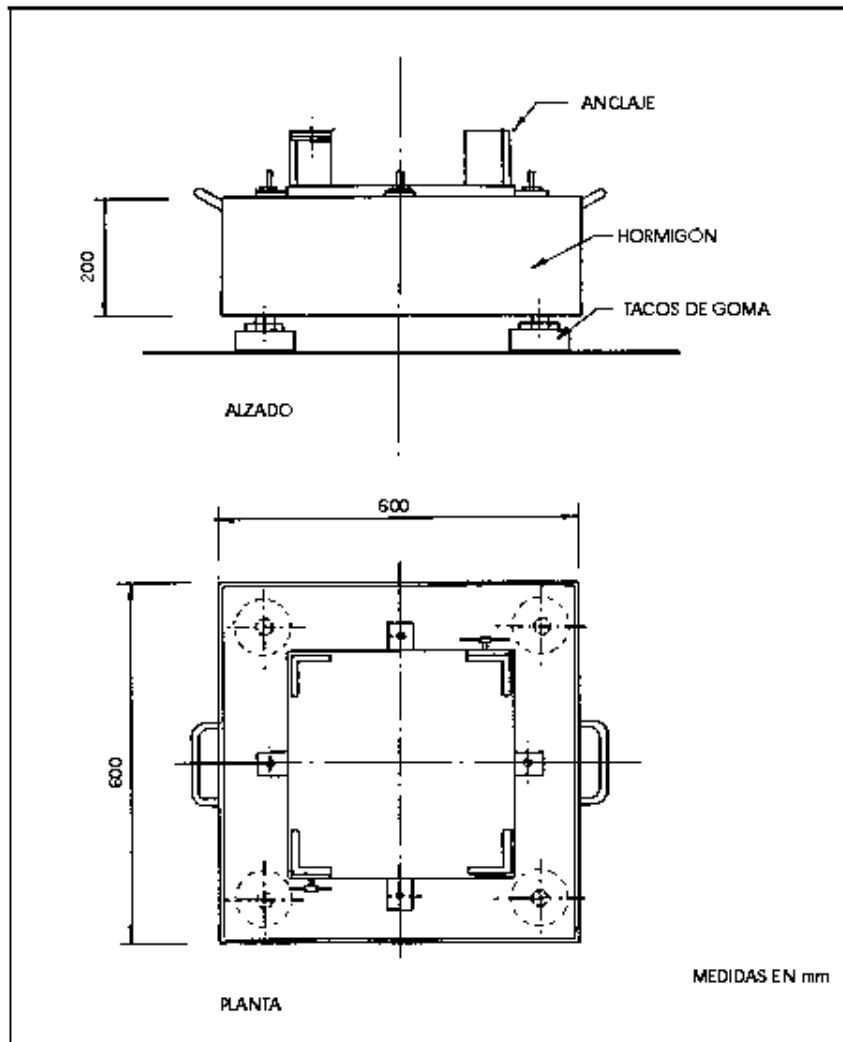


FIGURA 3. Base de compactación.

Nota 2. Los vibradores tipo WACKER-WERKE AR 2/3/380, de fuerza centrífuga variable entre 0 y 3 kN, son adecuados trabajando a su máxima potencia.

2.4 Utensilios de extensión y enrase. Con el objeto de lograr una distribución uniforme y homogénea de la mezcla en el molde así como un correcto enrasado, se dispondrá de los útiles con la forma y dimensiones que se detallan en la figura 5.

2.5 Máquina de ensayo. La máquina para el ensayo en pista de laboratorio, cuya forma y dimensiones fundamentales se indican en las figuras 6 y 7, consiste en esencia en un carretón móvil de forma rectangular, soportado en cuatro puntos por un sistema horizontal - vertical de ruedas metálicas provistas de cojinetes de bolas, capaces de deslizar sobre unos perfiles de apoyo

en forma de L. El carretón irá unido mediante una excéntrica a un motor-reductor que produce, al estar en funcionamiento, un movimiento alternativo horizontal de vaivén. Por encima de este carretón va situada la rueda de ensayo, montada en un brazo sustentador formado por una pareja de perfiles en L, brazo que, en uno de sus extremos, va unido mediante un cojinete horizontal a un soporte rígido de la máquina y el otro extremo libre y provisto de un dispositivo para colocar las pesas que producen las diferentes cargas sobre la rueda. El carretón móvil dispondrá de los elementos necesarios para la sujeción al mismo de la probeta de ensayo, llevando en uno de sus lados una superficie de medida que permita, mediante un micrómetro de esfera, solidario con la rueda de ensayo, u otro sistema de medida transductor de



Anexos

desplazamiento, la lectura de las deformaciones verticales que se produzcan en la probeta durante el ensayo. El micrómetro tendrá un recorrido mínimo de 20 mm y graduado en 0,1 mm. Además, deberá ir provisto del dispositivo de frenado del desplazamiento máximo del vástago. La rueda de ensayo será metálica y dotada de una banda de

rodadura de goma maciza de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor, con una dureza de 80 en la escala Dunlop. El mecanismo de arrastre del carretón móvil estará diseñado para permitir una frecuencia del movimiento de vaivén de (42 ± 1) pasadas por minuto y un recorrido en cada sentido de $(23 \pm 0,5)$ cm.

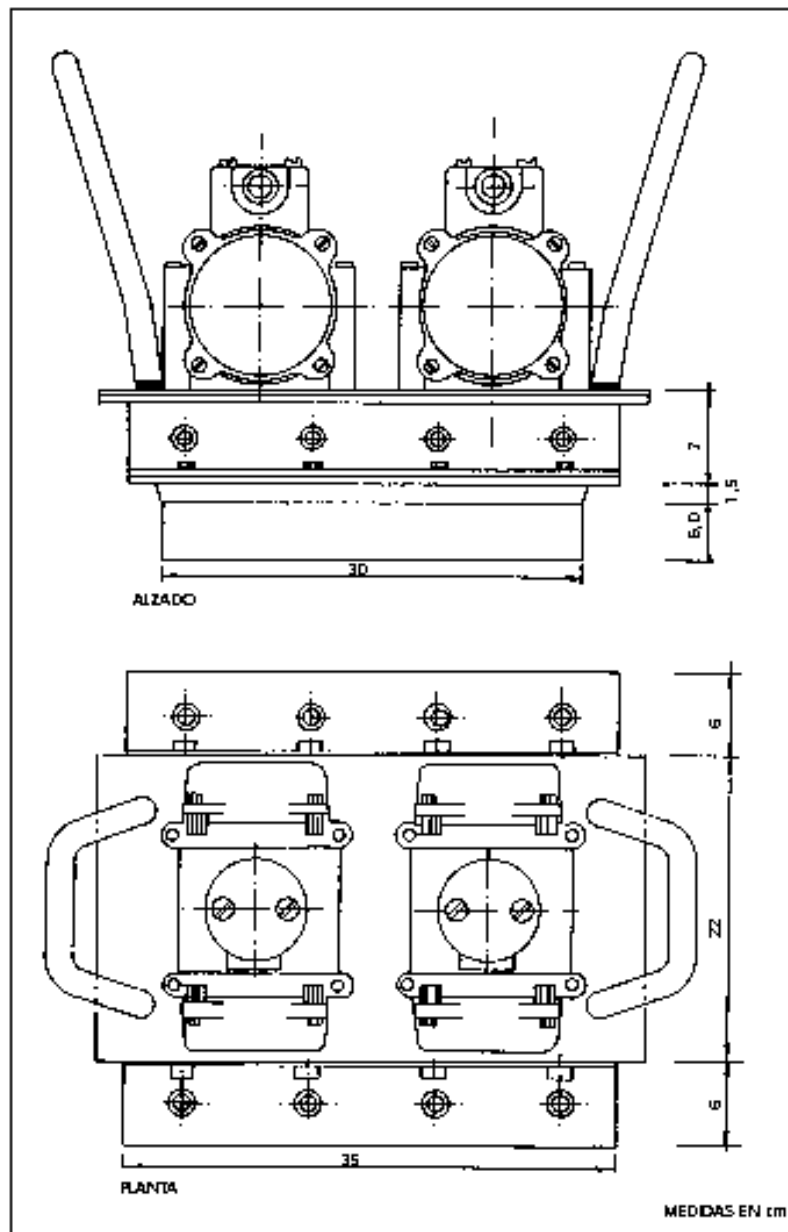


FIGURA 4. Elemento compactador.



Anexos

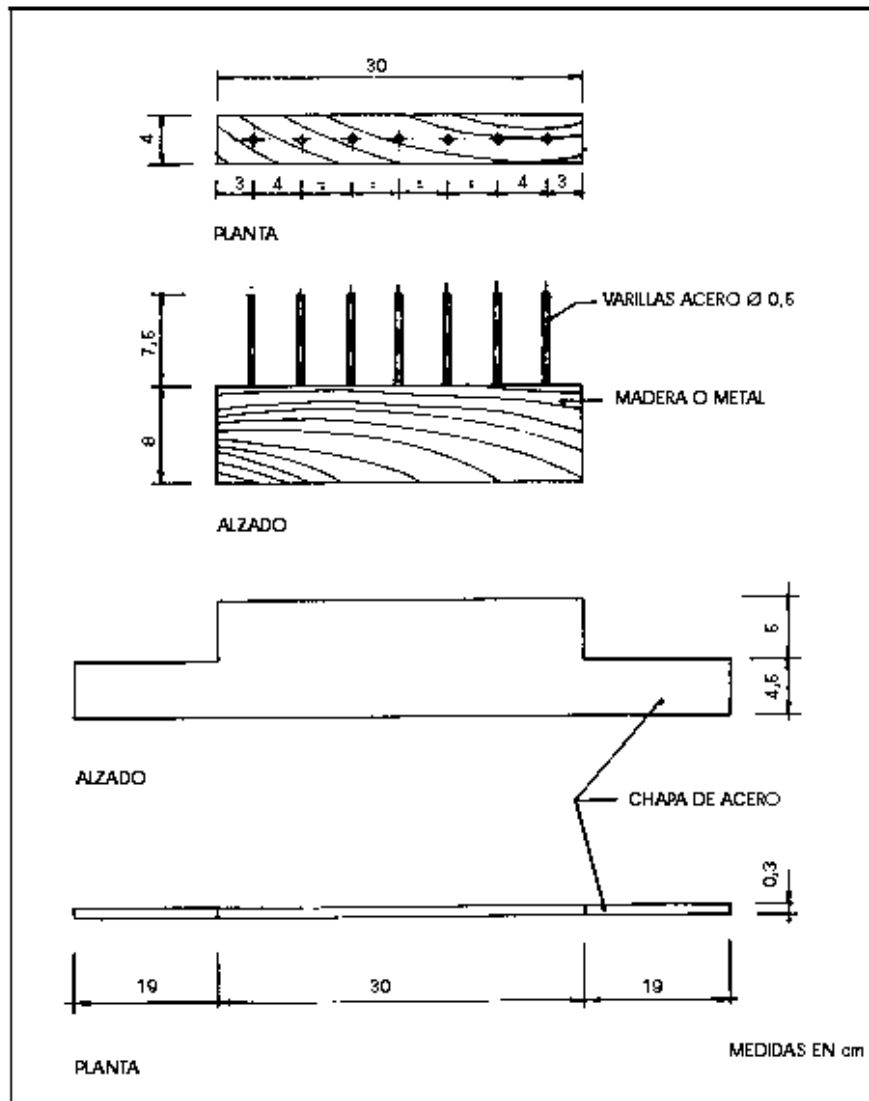


FIGURA 5. Utensilios de extensión y enrase.

2.6 Cámara termostática. Para lograr que la temperatura sea constante durante el ensayo, se dispondrá de una cámara que permita alojar la máquina y mantener la temperatura durante todo el ensayo con una variación máxima de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un modelo apropiado puede ser el fabricado con perfiles metálicos y paneles aislantes, con la forma y dimensiones que se sugieren en la figura 8. En uno de sus frentes llevará una ventana abatible acristalada para permitir la lectura, durante el ensayo, del micrómetro y de la temperatura. En uno de sus lados va situada la puerta de acceso de la máquina, para la colocación y retirada de la probeta. En el interior irá colocado el elemento calefactor, con termostato regulable desde el exterior, y dos ventiladores, uno situado detrás de dicho elemento

y el otro en posición lateral, con su eje perpendicular al del primero para una mejor homogeneización de la temperatura en el interior de la cámara.

2.7 Estufa. Para el calentamiento de los áridos, material bituminoso y moldes, se dispondrá de una o más estufas adecuadas, provistas de termostato que mantenga las temperaturas especificadas con un error menor de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.8 Mezcladora. Es preferible que la operación de mezclado de los materiales se realice en una mezcladora mecánica, pudiendo utilizarse cualquier tipo siempre que sea de la capacidad adecuada y permita mantener la temperatura de la mezcla dentro de los límites exigidos. Podrá, ade-



Anexos

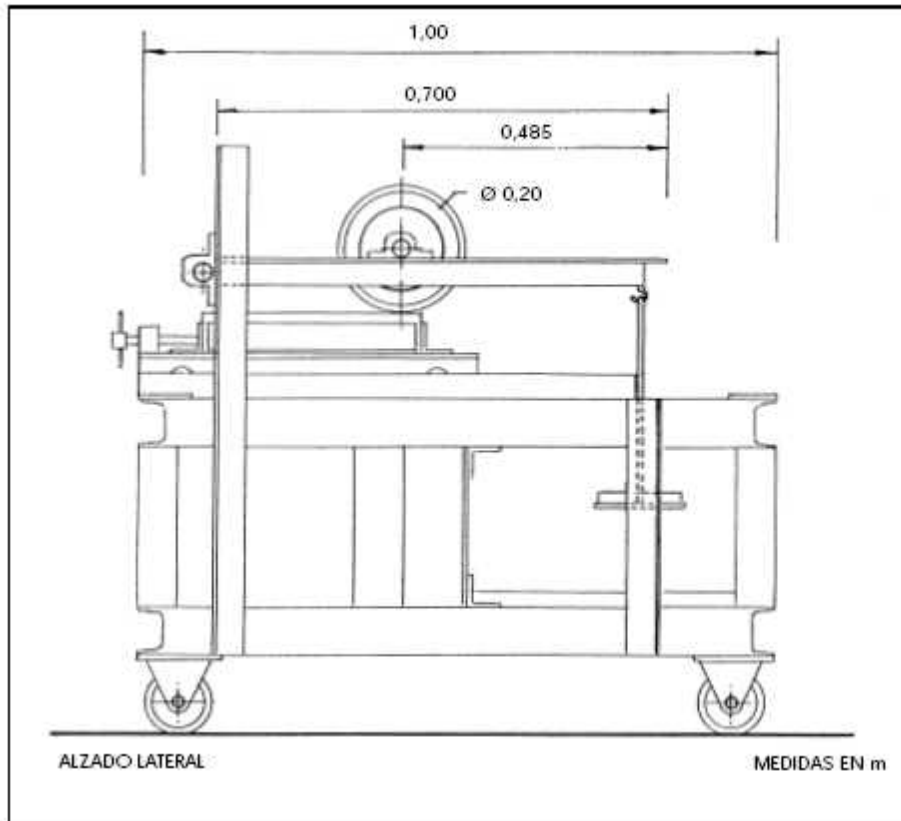


FIGURA 6. Máquina de ensayo.

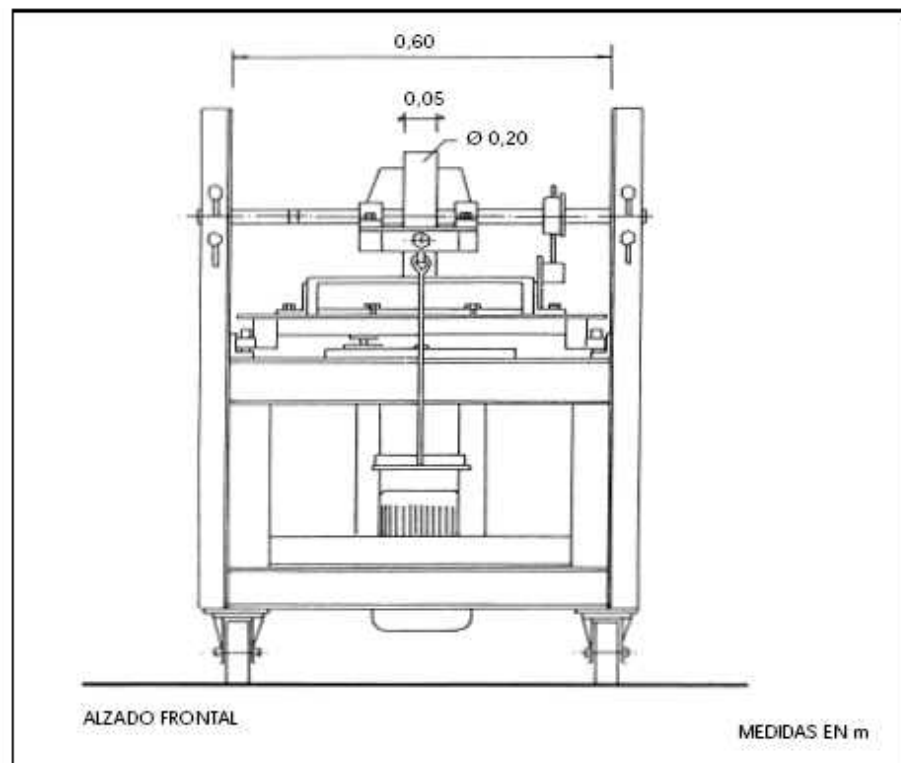


FIGURA 7. Máquina de ensayo.



Anexos

más, producir una mezcla uniformemente cubierta y homogénea en el tiempo prescrito, sin alteraciones en la granulometría y permitirá un vertido correcto de la mezcla fabricada. Si el mezclado se realiza manualmente, se empleará un recipiente de tamaño adecuado, tomando las precauciones necesarias para evitar los sobrecalentamientos locales.

2.9 Termómetros. Para las medidas de las temperaturas de los áridos, ligante y mezcla bituminosa, se emplearán termómetros con escala de 0 °C a 200 °C y sensibilidad mínima de 3 °C.

2.10 Balanzas. Para pesar los áridos se utilizarán balanzas con campo de pesada suficiente y una sensibilidad mínima de 5 g. Para la pesada del polvo mineral y del ligante bituminoso se dispondrá de balanzas de sensibilidad igual o menor que 1 g.

2.11 Material general. Bandejas, cazos, espátulas, cogedores curvos, guantes, etc.

3 PROCEDIMIENTO

3.1 Fabricación de las probetas

3.1.1 Número de probetas. Se fabricarán para cada ensayo un mínimo de tres probetas, por cada variable (contenido de ligante, temperatura, presión de contacto, etc.) que se desee estudiar.

3.1.2 Masa de las probetas. La cantidad de mezcla necesaria para cada probeta se calculará a partir de los valores correspondientes al volumen del molde y a la densidad relativa Marshall de la mezcla, para cuya aplicación se seguirán los siguientes criterios:

- En mezclas densas y semidensas (tráficos pesado y medio), se tomará para la densidad de la probeta el 97 % como mínimo, de la Marshall correspondiente.
- En las restantes mezclas, el cálculo se basará en el 95 % de la densidad Marshall.

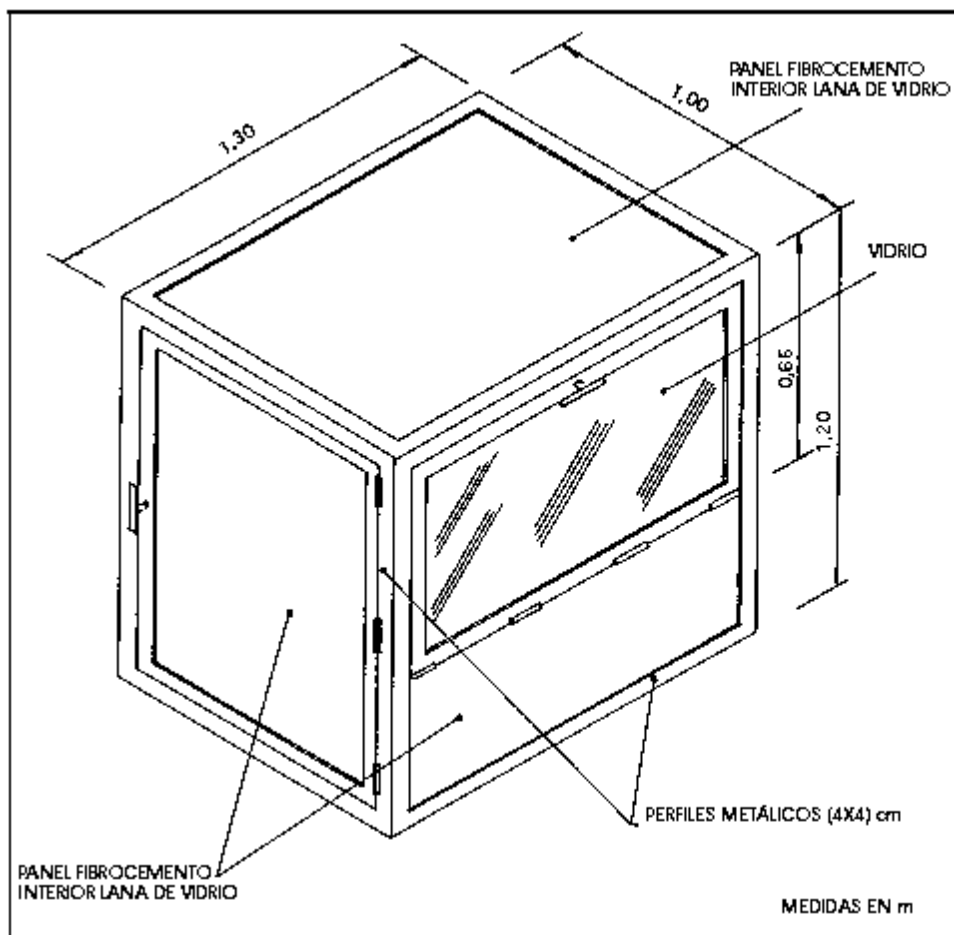


FIGURA 8. Cámara termostática.



Anexos

3.1.3 Preparación de los áridos. Las distintas fracciones que compongan la mezcla de áridos se secan en estufa a una temperatura entre 105 °C y 110 °C, hasta masa constante.

3.1.4 Temperaturas de mezcla y compactación. Para la mezcla y compactación de las probetas, las temperaturas elegidas estarán en función de la viscosidad del ligante. En el caso de emplear un betún asfáltico, estas viscosidades serán de (170 ± 20) cSt [(85 ± 10) SSF] en el proceso de mezcla y de (280 ± 30) cSt [(140 ± 15) SSF] en el de compactación.

3.1.5 Fabricación de la mezcla. Se pesan sucesivamente en un recipiente de tara conocida las cantidades de cada fracción de áridos necesarias para la fabricación de una probeta, según los criterios expuestos en el apartado 3.1.2. La masa total de áridos se calienta a continuación en la estufa a una temperatura unos 30 °C superior a la determinada para el mezclado según 3.1.4, calentando simultáneamente el ligante a la temperatura necesaria según este mismo apartado. Cuando ambos materiales estén a sus respectivas temperaturas, se transfieren los áridos al recipiente de mezcla y se realiza un primer mezclado en seco a efectos de homogeneización; cuando los áridos hayan alcanzado la temperatura de mezclado prescrita en el apartado 3.1.4, se añade rápidamente la cantidad necesaria de ligante (nota 3), realizando seguidamente la mezcla hasta conseguir un mezclado completo y homogéneo, no debiéndose emplear en esta operación más de dos minutos.

Nota 3. El ligante no deberá mantenerse a su temperatura de mezcla más de una hora.

3.1.6 Compactación de las mezclas. El molde y el collarín se calentarán en la estufa a una temperatura unos 15 °C superior a la de compactación. Una vez calientes, se coloca el molde sobre la base de compactación en su anclaje y se monta el collarín. Se transfiere a continuación la mezcla ya preparada al molde, a una temperatura como mínimo de 10 °C superior a la de compactación, evitando las segregaciones del material y se distribuye uniformemente y enrasa con los útiles correspondientes. Sobre la mezcla ya nivelada se coloca el elemento compactador y se realiza una compactación inicial de 75 s de duración, acabada la cual se desmonta el collarín, que se sustituye por los cuatro angulares colocados en los vértices del molde. A continuación se completa el proceso de compactación mediante otros 3 periodos de 75 s cada uno, realizados girando, en el mismo sentido y sucesivamente, el elemento compactador 90 grados respecto a la posición inicial. La compactación puede aceptarse como correcta siempre que la altura de la probeta esté dentro de ± 2

mm respecto a los bordes del molde para probetas de espesor ≤ 50 mm, y del 5 % de tal espesor para probetas con espesor ≥ 50 mm. Una vez finalizada la compactación, se deja enfriar la mezcla a temperatura ambiente durante un periodo entre 12 y 24 horas, antes de ensayarla.

3.1.7 Determinación de la densidad. Si se desea comprobar la densidad alcanzada por la probeta, se procede al desmoldeo de ésta una vez fría (nota 4), determinando su masa mediante la balanza y su volumen por medidas geométricas de sus dimensiones. Deberán tomarse las precauciones necesarias para no alterar la probeta durante esta manipulación, debido a su forma y masa, volviéndola a colocar dentro del molde y en la misma posición relativa que tenía, lo más rápidamente posible.

Nota 4. Si se dispone de una balanza de suficiente carga para determinar la masa total de la probeta y el molde, puede realizarse esta determinación sin necesidad de desmoldar la probeta, conociendo previamente la masa del molde vacío y sus dimensiones interiores.

3.1.8 Testigos de firme. Cuando las muestras sean testigos procedentes de un firme ya construido, si aquéllos son de gran tamaño se pondrá un especial cuidado en su corte, almacenamiento y manejo, evitando deformaciones que pudieran alterar su geometría inicial. Sus dimensiones deben ser algo inferiores a las del molde, fijándolo a éste con escayola u otro material adecuado y procurando un asentamiento firme y duradero sobre la base, en evitación de cualquier movimiento o rotura durante el ensayo y manteniendo su superficie superior en el mismo plano horizontal del molde.

3.2 Realización del ensayo

3.2.1 Temperatura de ensayo. La temperatura normalizada para el ensayo será de (60 ± 1) °C para todo tipo de mezclas y zonas climáticas. No obstante, pueden utilizarse otras temperaturas en estudios o ensayos especiales que así lo requieran.

3.2.2 Presión de contacto de la rueda. La presión de contacto normalizada ejercida por la rueda cargada sobre la superficie de la probeta durante todo el ensayo, será de (900 ± 25) kN/m², [(9 ± 0,25) kgf/cm²], para todo tipo de mezclas y zonas climáticas. Sin embargo, en casos especiales o cuando así se requiera, pueden utilizarse otras presiones de contacto.

3.2.3 Ejecución del ensayo. Después del periodo de enfriamiento de la mezcla, detallado en el apartado 3.1.6, las probetas se introducen en una estufa regulada a (60 ± 2) °C durante cuatro horas como mínimo antes de la ejecución del ensayo. Dos horas



Anexos

antes del comienzo del ensayo se conecta el sistema de calefacción de la cámara termostática, regulándolo a la temperatura especificada. Transcurrido este tiempo, se saca la primera probeta de la estufa, se levanta la rueda (nota 5) y se fija el molde con la probeta en los anclajes que para este fin lleva el carretón móvil, sin que la rueda toque en ningún momento la superficie de la probeta. En estas condiciones se carga el brazo soporte con las pesas necesarias para conseguir la presión especificada, se cierra la cámara y se espera unos 30 minutos con objeto de homogeneizar la temperatura del ensayo. Seguidamente se apoya la rueda cargada sobre la superficie de la probeta y se pone en marcha el carretón durante tres pasadas completas, para conseguir un asentamiento de la rueda sobre la probeta. A continuación se para el carretón y, situándolo en el punto de medida del micrómetro, se pone éste a cero. Se cierra entonces la ventana lateral y transcurridos unos 5 minutos se comienza el ensayo, poniendo en movimiento el carretón durante un periodo de tiempo de 120 minutos sin interrupciones, o hasta que la deformación total alcance 15 mm, si ocurre antes, haciendo periódicamente las correspondientes lecturas de la deformación, según el apartado 4.1.1. Una vez finalizado el ensayo, se detiene la máquina, se levanta la rueda (nota 5), y se extrae la probeta ensayada, colocando seguidamente la siguiente y repitiendo el mismo procedimiento de ensayo tal como se ha descrito.

Nota 5. Para facilitar la operación de montar o desmontar la probeta, es conveniente disponer de algún aparato que permita mantener la rueda levantada.

4 RESULTADOS

4.1 Obtención de los resultados

4.1.1 Se determinan y anotan las deformaciones totales leídas en el micrómetro en los minutos 1, 3 y 5 contados a partir del comienzo del ensayo; a continuación cada 5 minutos hasta completar los 45 minutos y, a partir de aquí, cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración del ensayo.

4.1.2 Ensayadas todas las probetas, se calculan los valores medios de todas las deformaciones registradas correspondientes, según el apartado 4.1.1, los cuales se pasan a un gráfico deformación-tiempo y se dibuja la curva de deformación de la mezcla.

4.1.3 A partir de las deformaciones, d , determinadas en el gráfico, correspondientes a los tiempos t del ensayo, se calcula, mediante la fórmula:

$$V_{2t_2 t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{t_2 - t_1}$$

la velocidad, V , de deformación media correspondiente al intervalo de tiempos t_2/t_1 , parámetro que vendrá expresado en 10^2 mm/min.

4.2 Expresión de los resultados

4.2.1 Los resultados del ensayo incluirán la siguiente información:

- Tipo y características de la mezcla.
- Origen de la mezcla (laboratorio, obra, testigo, etcétera).
- Temperatura del ensayo.
- Presión de contacto.
- Deformación total al final del ensayo, en mm.
- Representación gráfica de la curva deformación-tiempo.
- Velocidades de deformación en aquellos intervalos de tiempo en los que se manifieste claramente el comportamiento de la mezcla en el ensayo, como pueden ser:
 - Velocidad en el intervalo 30 a 45 minutos, $V_{30/45}$
 - Velocidad en el intervalo 75 a 90 minutos, $V_{75/90}$
 - Velocidad en el intervalo, 105 a 120 minutos, $V_{105/120}$

5 PRECISIÓN

Nota 6. Los valores de precisión que se muestran en la tabla 1 se determinaron experimentalmente en el Reino Unido siguiendo la norma ISO 5725. Las muestras procedentes de firme (testigos) se estudiaron en 1992 en once laboratorios, de los que se excluyeron los datos procedentes de uno por erráticos. Las muestras fabricadas en laboratorio se estudiaron en 1994 en siete laboratorios. Para ambos experimentos la temperatura de ensayo fue de 45 °C, la carga de 700 N y los resultados son la media de la velocidad de deformación de seis porciones de la muestra para ensayo.

Muestras	Nivel del resultado de ensayo (mm/h)	Repetibilidad r (mm/h)	Reproducibilidad R (mm/h)
Laboratorio	2,6	0,6	1,2
Firme	2,2	0,8	1,4
	8,1	3,1	5,9
	13,5	4,0	5,7

TABLA 1. Precisión para las velocidades de deformación (mm/h) en mezclas de laboratorio y de firme.



Anexos

6 CORRESPONDENCIA CON OTRAS NORMAS

Wheel Tracking Test. (Transport and Road Research Laboratory).

«Comprobación y Puesta a punto de la Norma provisional para la Máquina de Ensayo en Pista de Laboratorio». Documento núm. 2 (TM-2817). Labo-

ratorio del Transporte y Mecánica del Suelo «José Luis Escario». Dic. 1978.

PrEN 12697 - 22 «Test methods for hot mix asphalt - Wheel tracking». Work item No. 00227128. 1997.

BS 598-110:1998 «Methods of test for the determination of wheel-tracking rate and depth».



AASHTO TP 63-07

Standard Method of Test for

Determining Rutting Susceptibility of Hot-Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Pavement Analyzer (APA)



AASHTO Designation: TP 63-07¹

1. SCOPE

- 1.1. This method describes a procedure for testing the rutting susceptibility of hot-mix asphalt (HMA) using the Asphalt Pavement Analyzer (APA).
- 1.2. The Annex contains procedures for calibration checks for several APA components and related equipment.
- 1.3. The Appendix presents specifications for and discussion concerning several options for APA testing parameters often employed by APA users.
- 1.4. The value stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.
- 1.5. *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety concerns associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. REFERENCED DOCUMENTS

- 2.1. *AASHTO Standards:*
 - T 166, Bulk Specific Gravity of Compacted Hot-Mix Asphalt Using Saturated Surface-Dry Specimens
 - T 168, Sampling Bituminous Paving Mixtures
 - T 209, Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot-Mix Asphalt Paving Mixtures
 - T 269, Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Asphalt Mixtures
 - T 312, Preparing and Determining the Density of Hot-Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor
- 2.2. *ASTM Standard:*
 - E 1, Specification for ASTM Liquid-in-Glass Thermometers



Anexos

3. APPARATUS

- 3.1. **APA**—A thermostatically controlled device designed to test the rutting susceptibility of HMA by applying repetitive linear loads to compacted test specimens through pressurized hoses via wheels.
- 3.1.1. The APA shall be thermostatically controlled to maintain the test temperature and conditioning chamber at any set-point between 4 and 72°C (40 and 160°F) within 1°C (2°F).
- 3.1.2. The APA shall be capable of independently applying loads up to 578 N (130 lbf) to the wheels. The loads shall be calibrated to the specified test load by an external-force transducer.
- 3.1.3. The APA shall be capable of adjusting the pressure in the test hoses and maintaining up to 862 kPa (125 psi) in the test hoses.
- 3.1.4. The APA shall be capable of testing six cylindrical specimens.
- 3.1.5. The test molds shall be rectangular in shape, be composed of ultra-high molecular weight (UHMW) polyethylene, fit snugly within the testing position in the APA testing chamber, and contain two holes in which to insert the specimens. The dimensions of each hole shall be 150 ± 2.0 mm (5.91 ± 0.08 in.) in diameter by 75.0 ± 2.0 mm (2.95 ± 0.08 in.) tall.
- 3.1.6. The APA shall have a programmable master cycle counter that can be preset to the desired number of cycles for a test. The APA shall be capable of automatically stopping the test at the completion of the programmed number of cycles.
- 3.1.7. The test hoses shall be composed of a nylon tube with high-tensile textile cord reinforcement and a synthetic rubber cover. The nominal inside diameter of the hoses shall be 19.0 mm (0.75 in.); the nominal outside diameter of the hoses shall be 29.5 mm (1.16 in.). The maximum working pressure (WP) of the hoses shall be 5.17 MPa (750 psi). The hoses should be replaced when any of the outer rubber casing exhibits significant wear. Follow the APA manufacturer's instructions for the technique on replacing hoses.
- Note 1**—A Gates 77B Paint Spray and Chemical hose has been found to be satisfactory. This hose is available from the Gates Corporation (Product No. 3207-0296).
- 3.1.8. When electing to manually measure rut depths, a rut depth measurement template is required. This template shall be machined from 38.1-mm (1.5-in.) thick aluminum plate and have the following dimensions: 400.0 mm (15.75 in.) long by 152.4 mm (6 in.) wide. The rut depth measurement template shall contain five openings, equally spaced along the length of the template, in which the ruts are measured. Each of the five openings shall be 11.11 mm (0.438 in.) wide.
- 3.1.9. The APA shall be calibrated in accordance with the Annex.
- 3.2. *Ovens for maintaining temperature of plant-produced HMA and preheating specimens.*
- 3.3. *Compaction device and molds:*
- 3.3.1. Superpave gyratory compactor (SGC) and compaction molds conforming to T 312, or
- 3.3.2. Vibratory compactor and compaction molds.



Anexos

- 3.3.2.1. **Vibratory compactor**—A steel-frame device mounted on noise-absorbing isolators and supports that utilizes adjustable vibratory compression forces to consolidate and compact HMA to produce cylindrical specimens for further testing. The device shall be timer-controlled and capable of compacting the specimens to a specified height and extracting the specimens after compaction. The vibratory compactor shall have a control panel separate from the compaction unit. The panel shall contain a mode switch to control specimen compaction and extraction and a timer to control the compaction-time cycle.
- 3.3.2.2. The compaction molds used for specimens produced in the vibratory compactor shall be composed of steel with the following dimensions:
- inside diameter of 149.9 ± 0.5 mm (5.90 ± 0.02 in.);
 - inside height of 133.4 ± 0.5 mm (5.25 ± 0.02 in.);
 - overall height of 152.7 ± 0.5 mm (6.01 ± 0.02 in.);
 - wall thickness of 7.81 ± 0.5 mm (0.31 ± 0.02 in.); and
 - bottom plate diameter of 149.0 ± 0.5 mm (5.87 ± 0.02 in.).

4. PREPARATION OF TEST SPECIMENS

- 4.1. **Number and dimensions of test specimens**—Six cylindrical specimens, 150 mm (5.91 in.) in diameter by 75 ± 2 mm (3.0 ± 0.1 in.) tall.
- 4.2. **Roadway Core Specimens:**
- 4.2.1. Roadway core specimens shall be 140 to 152 mm (5.5 to 6.0 in.) in diameter and a minimum of 50 mm (2 in.) tall with all surfaces of the perimeter perpendicular to the surface of the core within 5 mm (0.2 in.). Cores taller than the desired height shall be trimmed with a saw to a height of 75 ± 2 mm (3.0 ± 0.1 in.). For cores with diameters between 140 and 152 mm (5.5 and 6.0 in.) or heights between 50 and 73 mm (2.0 and 2.9 in.), plaster-of-Paris or comparable material may be used to achieve the proper testing height of 75 ± 2 mm (3.0 ± 0.1 in.) and to ensure that specimens with small diameters fit snugly within the testing mold. Testing shall be conducted on the uncured face of the core.
- 4.3. **Plant-Produced (HMA):**
- 4.3.1. Samples of plant-produced HMA shall be obtained in accordance with T 168. HMA samples shall be reduced to the appropriate test size and compacted while the HMA is within the compaction temperature range as determined by the specifying agency. Reheating of loose plant HMA should be avoided.
- 4.3.2. When using an SGC, compact specimens conforming to the dimensional requirements of Section 4.1 to 7.0 ± 0.5 percent air voids in accordance with T 312.
- 4.3.3. When using a vibratory compactor, compact specimens conforming to the dimensional requirements of Section 4.1 to 7.0 ± 0.5 percent air voids in accordance with the following procedure.
- 4.3.3.1. Attach and level the appropriate compaction head to the vibrating assembly in accordance with the manufacturer's instructions. Verify that the compaction head is correctly attached and arranged to



Anexos

produce a specimen of the desired height. Check the position of the compaction head against the specimen mold in accordance with the manufacturer's instructions.

- 4.3.3.2. Adjust the compaction force and vibration time settings in accordance with the manufacturer's instructions.
- 4.3.3.3. Heat and charge the specimen mold in accordance with the manufacturer's instructions.
- 4.3.3.4. Operate the vibratory compactor in order to compact and extrude the specimen in accordance with the manufacturer's instructions.
- 4.3.4. Compacted specimens should remain at room temperature, approximately 25°C (77°F), to allow the entire specimen to cool, for a minimum of 3 h.
- 4.4. *Laboratory-Prepared (HMA):*
 - 4.4.1. Prepare the ingredient materials and mix the HMA specimens in accordance with T 312.
 - 4.4.2. When using an SGC, compact specimens conforming to the dimensional requirements of Section 4.1 to 7.0 ± 0.5 percent air voids in accordance with T 312.
 - 4.4.3. When using a vibratory compactor, compact specimens conforming to the dimensional requirements of Section 4.1 to 7.0 ± 0.5 percent air voids in accordance with the procedure given in Sections 4.3.3.1 through 4.3.3.4.
 - 4.4.4. Compacted specimens should remain at room temperature, approximately 25°C (77°F), to allow the entire specimen to cool, for a minimum of 3 h.

5. DETERMINING THE AIR VOID CONTENT

- 5.1. Determine the bulk specific gravity of the HMA specimens in accordance with T 166. In the case of sawn specimens as described in Section 4.2, determine the bulk specific gravity of the specimens after sawing.
- 5.2. Determine the maximum specific gravity of the loose HMA in accordance with T 209.
- 5.3. Determine the air void content of the HMA specimens in accordance with T 269.

6. SELECTING THE TEST TEMPERATURE

- 6.1. The test temperature shall be set to the high temperature of the standard Superpave performance-graded (PG) binder identified by the specifying agency for the project that the HMA is intended. For circumstances where the high-temperature binder grade has been increased, the APA test temperature will remain at the standard PG binder high temperature.

7. SPECIMEN PREHEATING

- 7.1. Place the specimens in the test molds.



Anexos

- 7.2. Specimens shall be preheated at the test temperature in the temperature-calibrated APA test chamber or a separate calibrated oven for a minimum of 6 h. Specimens should not be held at the test temperature for more than 24 h prior to testing.

8. PROCEDURE

- 8.1. Set the hose pressure gauge reading to 690 ± 35 kPa (100 ± 5 psi). Set the load cylinder pressure reading for each wheel to achieve a load of 445 ± 22 N (100 ± 5 lbf).
- 8.2. Stabilize the testing chamber temperature at the temperature selected in Section 6.
- 8.3. Secure the preheated, molded specimens in the APA. The preheated APA chamber should not be open more than 6 min when securing the test specimens into the machine. Close the chamber doors, and allow a minimum of 10 min for the temperature to stabilize prior to starting the test.
- 8.4. *Manual Rut-Depth Measurement:*
- 8.4.1. Apply 25 cycles to seat the specimens before taking the initial measurements. Make adjustments to the hose pressure as needed during these 25 cycles.
- 8.4.2. Open the chamber doors; unlock and pull out the sample holding tray.
- 8.4.3. Place the rut-depth-measurement template conforming to Section 3.1.8 over the specimen. Ensure that the rut-depth-measurement template is properly seated and firmly rests on top of the testing mold.
- 8.4.4. Zero the measuring gauge. Take initial readings at each of the four outside locations on the template; the center measurement is not used. Measurements shall be determined by placing the measuring gauge in the template slots and sliding the gauge slowly across each slot. Record the smallest measurement for each location to the nearest 0.01 mm (0.0004 in.).
- 8.4.5. Repeat Sections 8.4.3 and 8.4.4 for each set of cylinders in the testing position. All measurements shall be completed within 6.0 ± 0.5 min.
- 8.4.6. Push the sample holding tray in, and secure it. Close the chamber doors, and allow a minimum of 10 min for the temperature to stabilize.
- 8.4.7. Set the preset counter to 8000 cycles.
- 8.4.8. Start the test. When the test reaches 8000 cycles, the APA will stop, and the load wheels will automatically retract.
- 8.4.9. Repeat Sections 8.4.2 through 8.4.5 to obtain the final measurements.
- 8.5. *Automatic Rut-Depth Measurement:*

Note 2—Some APA users have reported significant differences in rut depths between automatic measurements and manual measurements.



Anexos

-
- 8.5.1. Initialize the APA computer software. Using the APA computer software or on the APA as appropriate, enter the applicable test parameters and project information prior to starting the test.
 - 8.5.2. Ensure that the cycle-countdown mechanism is set to a value that will permit the specimens to be seated, a complete test of 8000 cycles to be performed, and the computer program to be disengaged at the end of the test. Normally, this value is between 8050 and 8100 cycles.
 - 8.5.3. Using the APA computer software or on the APA as appropriate, start the test.
 - 8.5.4. The APA will stop when the test is complete, and the wheels will automatically retract. Save the rut-depth data file to the computer. Print the data if desired.

9. CALCULATIONS

- 9.1. Determine the average rut depth for each of the three test positions.
 - 9.1.1. When utilizing manual rut-depth measurement, determine the rut depth at each location by subtracting the final measurement from the initial measurement. Use the rut depth for all four locations to calculate the average rut depth for each of the three test positions.
 - 9.1.2. When utilizing automatic rut-depth measurement, obtain the rut depths from the three test positions as displayed on the APA computer software.
- 9.2. *Outlier Evaluation*—Calculate the sample standard deviation for the three test positions. If the sample standard deviation of the three test positions is greater than or equal to 2.0 mm (0.08 in.), then the position with the rut depth farthest from the average may be discarded. The testing procedure, device calibration, and test specimens should be investigated to determine possible causes for the excessive variation.
- 9.3. The APA rut depth for the HMA is the overall average rut depth for the three test positions, less any outliers, from the six cylindrical specimens.

10. REPORT

- 10.1. *The test report shall include the following information:*
 - 10.1.1. The laboratory name, technician name, and date of the test;
 - 10.1.2. The HMA type and description;
 - 10.1.3. The type of test specimens (cylinders or cores);
 - 10.1.4. For cylinders, the type of compaction device (SGC or vibratory compactor);
 - 10.1.5. The average air void content of the test specimens;
 - 10.1.6. The test temperature;
 - 10.1.7. The method utilized to measure rut depth (manual or automatic); and



Anexos

-
- 10.1.8. The average rut depth for each of the three test positions, and the overall average rut depth for the HMA, to the nearest 0.1 mm (0.0004 in.).

11. PRECISION AND BIAS

- 11.1. Work is underway to develop precision and bias statements for this standard.

ANNEX

(Mandatory Information)

A1. CALIBRATION

- A1.1. The following items should be checked for calibration no less than once per year: (1) preheating oven, (2) APA temperature, (3) APA wheel load, and (4) APA hose pressure. Instructions for each of these calibration checks are included in this section. For APAs equipped with the automatic rut-depth measurement system, calibrate the horizontal and vertical components of the data-acquisition system according to the manufacturer's schedule and instructions.

A1.2. *Temperature calibration of the preheating oven:*

- A1.2.1. The preheating oven must be calibrated with a NIST-traceable thermometer [an ASTM No. 65C (65F) calibrated thermometer conforming to ASTM E 1 is recommended] and a metal thermometer well to avoid rapid heat loss when checking the temperature.

A1.2.2. *Temperature Stability:*

- A1.2.2.1. Set the oven to the chosen temperature [e.g., 64°C (147°F)]. Place the thermometer in the well, and place the thermometer and well on the center of the shelf where the samples and molds will be preheated. It usually takes an hour or so for the oven chamber, well, and thermometer to stabilize. After 1 h, open the oven door, and read the thermometer without removing it from the well. Record this temperature. Close the oven door.

- A1.2.2.2. Thirty minutes after obtaining the first reading, obtain another reading of the thermometer. Record this temperature.

- A1.2.2.3. If the readings from Sections A1.2.2.1 and A1.2.2.2 are within 0.4°C (0.8°F), average the readings. If the readings differ by more than 0.4°C (0.8°F), continue to take readings every 30 min until the temperature stabilizes within 0.4°C (0.8°F) on two consecutive readings.

A1.2.3. *Temperature Uniformity:*

- A1.2.3.1. To check the uniformity of the temperature in the oven chamber, move the thermometer and well to another location in the oven so that they are on a shelf where the samples and molds will be preheated, but as far as possible from the first location. Take and record readings of the thermometer at the second location every 30 min until two consecutive readings at the second location are within 0.4°C (0.8°F).

- A1.2.3.2. Compare the average of the two readings at the first location from Section A1.2.2.3 with the average of the stabilized temperature at the second location. If the average temperatures from the two locations are within 0.4°C (0.8°F), the oven temperature is relatively uniform, and it is



Anexos

suitable for use in preheating APA samples. If the average of the readings at the two locations differs by more than 0.4°C (0.8°F), another oven that will maintain this level of uniformity and meet calibration must be utilized.

A1.2.4. Temperature Accuracy:

A1.2.4.1. Average the temperatures from the two locations (Section A1.2.2.3 and A1.2.3.2.). If that average temperature is within 0.4°C (0.8°F) of the set-point temperature on the oven, the oven is reasonably accurate and calibration is complete.

A1.2.4.2. If the set point differs from the average temperature by more than 0.4°C (0.8°F), adjust the oven set point appropriately to raise or lower the temperature inside the oven chamber so that the thermometer and well will be at the desired temperature [e.g., 64°C (147°F)].

A1.2.4.3. Place the thermometer and well on the center of the shelf. At 30-min intervals, take readings of the thermometer. When two consecutive readings are within 0.4°C (0.8°F), and the average of the two consecutive readings is within 0.4°C (0.8°F) of the desired test temperature [e.g., 64°C (147°F)], the oven has been properly adjusted and calibration is complete. If these two conditions are not satisfied, repeat Sections A1.2.4.2 and A1.2.4.3.

A1.3. APA Temperature Calibration:

A1.3.1. The APA must be calibrated with a NIST-traceable thermometer [an ASTM No. 65C (65F) calibrated thermometer conforming to ASTM E 1 is recommended] and a metal thermometer well to avoid rapid heat loss when checking the temperature.

A1.3.2. Temperature Stability:

A1.3.2.1. Turn on the APA main power, and set the chamber temperature controller so that the inside of the testing chamber is at the anticipated testing temperature [e.g., 64°C (147°F)]. Also, if applicable, set the water temperature controller to achieve the anticipated testing temperature.

Note A1—Due to possible variability in the APA temperature controller, the thermometer reading should always be considered as the chamber temperature.

A1.3.2.2. Place the thermometer in the well, and place the thermometer and well on the left side of the APA where the samples are tested.

Note A2—It may be helpful to remove the hose rack from the APA during the temperature calibration to avoid breaking the thermometer.

A1.3.2.3. It usually takes about 5 h for the APA temperature to stabilize. After the temperature display on the controller has stabilized, open the chamber doors, and read the thermometer without removing it from the well. Record this temperature. Close the chamber doors.

A1.3.2.4. Thirty minutes after obtaining the first reading, obtain another reading of the thermometer. Record this temperature.

A1.3.2.5. If the readings from Sections A1.3.2.3 and A1.3.2.4 are within 0.4°C (0.8°F), average the readings. If the readings differ by more than 0.4°C (0.8°F), continue to take readings every 30 min until the temperature stabilizes within 0.4°C (0.8°F) on two consecutive readings.



Anexos

A1.3.3. *Temperature Uniformity:*

A1.3.3.1. To check the uniformity of the temperature in the APA chamber, move the thermometer and well to the right side of the APA where the samples are tested. Take and record readings of the thermometer at the second location every 30 min until two consecutive readings at the second location are within 0.4°C (0.8°F).

A1.3.3.2. Compare the average of the two consecutive readings obtained in Sections A1.3.2.5 and A1.3.3.1. If the average temperatures from the two locations are within 0.4°C (0.8°F), the APA temperature is relatively uniform, and it is suitable for use. If the average of the readings at the two locations differs by more than 0.4°C (0.8°F), consult the manufacturer on improving the temperature uniformity.

A1.3.4. *Temperature Accuracy:*

A1.3.4.1. Average the temperatures from the two locations (Sections A1.3.2.5 and A1.3.3.2.). If that average temperature is within 0.4°C (0.8°F) of the desired test temperature [e.g., 64°C (147°F)], the APA temperature is reasonably accurate, and calibration is complete.

A1.3.4.2. If the average temperature differs from the desired test temperature [e.g., 64°C (147°F)] by more than 0.4°C (0.8°F), adjust the APA temperature controller so that the thermometer and well will be at the desired test temperature.

Note A3—It is advisable to keep the water bath set at the same temperature as the test chamber.

A1.3.4.3. Place the thermometer and well on the center of the shelf. At 30-min intervals, take readings of the thermometer. When two consecutive readings are within 0.4°C (0.8°F), and the average of the two consecutive readings is within 0.4°C (0.8°F) of the desired test temperature [e.g., 64°C (147°F)], the APA temperature has been properly adjusted, and calibration at that temperature is complete. Record the current set points on the temperature controllers for later reference. If these two conditions are not satisfied, repeat Sections A1.3.4.2 and A1.3.4.3.

A1.4. APA wheel load calibration of the air cylinders at the three test positions.

A1.4.1. Check the APA wheel loads with the calibrated load cell provided with the APA. Check and adjust the loads one at a time while the other wheels are in the “down” position and bearing on a dummy sample or wooden block of approximately the same height as a test sample. Calibration of the wheel loads should be accomplished with the APA at room temperature.

A1.4.1.1. Remove the hose rack from the APA.

A1.4.1.2. “Jog” the wheel carriage until the wheels are over the center of the sample tray when the wheels are in the “down” position.

A1.4.1.3. Raise and lower the wheels 20 times to heat up the cylinders.

A1.4.1.4. Adjust the bar on top of the load cell until the total height of the load cell/load bar assembly is 105 ± 5 mm (4.1 ± 0.2 in.).

A1.4.1.5. Position the load cell under one of the wheels. Place wooden blocks or dummy samples under the other two wheels.



Anexos

-
- A1.4.1.6. Zero the load cell.
 - A1.4.1.7. Lower all wheels by turning the cylinder switch to “CAL.”
 - A1.4.1.8. If the load cell is **not centered left-to-right beneath the wheel**, then raise the wheel, and adjust the position of the load cell. To determine if the load cell is centered front-to-back beneath the wheel, unlock the sample tray, and move it SLOWLY until the wheel rests in the indentation on the load-cell bar (where the screw is located).
 - A1.4.1.9. After the load cell has been properly centered, adjust the pressure in the cylinder to obtain $445 \pm 5 \text{ N}$ ($100 \pm 1 \text{ lbf}$). Allow 3 min for the load-cell reading to stabilize between adjustments. Record the pressure and load.
 - A1.4.1.10. With the wheel on the load cell remaining in the “down” position, raise and lower the other wheels one time. Allow 3 min for the load-cell reading to stabilize. Record the pressure and load.
 - A1.4.1.11. With the other wheels remaining in the “down” position, raise and lower the wheel over the load-cell. Allow 3 min for the load-cell reading to stabilize. Record the pressure and load.
 - A1.4.1.12. Repeat Sections A1.4.1.5 through A1.4.1.11 for each wheel/cylinder.
 - A1.4.1.13. Return the load cell to the first wheel, and repeat Sections A1.4.1.5 through A1.4.1.11.
 - A1.4.1.14. Place the load cell under the second wheel, and repeat Sections A1.4.1.5 through A1.4.1.11.
 - A1.4.1.15. Place the load cell under the third wheel, and repeat Sections A1.4.1.5 through A1.4.1.11. The current cylinder pressures will be used to set the wheel loads to 445 N (100 lbf).
 - A1.5. *Replacement of the APA hoses:*
 - A1.5.1. New hoses shall be placed in service in accordance with Section 3.1.7.
 - A1.5.1.1. Remove the hose rack from the APA.
 - A1.5.1.2. Remove the used hoses from the hose rack. For each position, place the new hose on the barbed nipples, and secure it with the hose clamps.
 - A1.5.1.3. Position the hoses in the rack such that the hose curvature is vertical. Tighten the nuts at the ends of the hoses only until the hoses are secure. Over-tightening will affect the contact pressure and hose life.
 - A1.5.1.4. Place the hose rack back into the APA, and ensure that the hoses are aligned beneath the wheels.
 - A1.5.1.5. Prior to formal testing, “break in” the new hoses by running 8000 cycles on a set of previously tested samples at a temperature of 55°C (131°F) or higher.
 - A1.6. *APA hose pressure check:*
 - A1.6.1. The air pressure in the APA test hoses shall be checked with a NIST-traceable test gauge or transducer with a suitable range while the APA is operating. Since the hoses are connected in series, it is satisfactory to connect the test gauge to the end of the right-most hose. The pressure



Anexos

should not fluctuate outside of the range of 690 ± 35 kPa (100 ± 5 psi) during normal operation. Adjust the pressure as necessary with the hose-pressure regulator.

Note A4—The Ashcroft test gauge, Model 450182As02L200#, has been found to be satisfactory for this purpose. This gauge is available through Grainger (Stock No. 2F008).

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. OPTIONAL APA TESTING PARAMETERS

- X1.1. The numerous testing parameters involved when utilizing the APA (e. g., hose pressure/wheel load, specimen air-void content, specimen height, etc.) present a great opportunity for multiple combinations. Accordingly, very few APA users employ the same set of testing parameters. One reason for this diversity is that the use of the APA predated the development of a standard for the APA. Most users developed their own method based on the manufacturer's instructions, accumulated substantial data with that method, and in some cases implemented a specification based on that data. Understandably, many APA users are hesitant to modify their testing parameters at this point.
- X1.2. This standard establishes a set of APA testing parameters for the sake of consistency and development of precision and bias statements. The parameters specified are based on the general experience of numerous APA users and are widely accepted within the industry. In fact, the specified test conditions represent the majority of APA users. However, the parameters established in this standard do not agree with the recommendations from NCHRP 9-17 (*NCHRP Report 508*) in every case. The NCHRP 9-17 study attempted to identify the APA test parameters that best correlate with field rutting performance.
- X1.3. Due to the diversity involved with the APA testing parameters throughout the community of users, this appendix presents specifications for, and discussion concerning, other test-condition options often employed by APA users.
- X1.4. *Beam Specimens:*
- X1.4.1. Some APA users test HMA beam specimens, rather than cylindrical specimens, for rut depth. Beam specimens can only be prepared by using the vibratory compactor. NCHRP 9-17 (*NCHRP Report 508*) included beam specimens as part of the research effort. When utilizing beam specimens in the APA, the following additional specifications are recommended:
- X1.4.1.1. The APA shall be capable of testing cylindrical or beam specimens.
- X1.4.1.2. The test molds for beam specimens shall be rectangular in shape, be composed of UHMW polyethylene, fit snugly within the testing position in the APA testing chamber, and contain one hole in which to insert the specimen. The dimensions of the hole shall be 75.0 ± 2.0 mm (2.95 ± 0.08 in.) tall by 125.0 ± 2.0 mm (4.92 ± 0.08 in.) wide by 300.0 ± 2.0 mm (11.81 ± 0.08 in.) long.
- X1.4.1.3. The compaction molds used for beam specimens shall be composed of steel and reinforced with 25.4 mm (1.00 in.) by 28.6 mm (1.13 in.) angle mounted 25.4 mm (1.00 in.) from the top of the mold. The molds shall conform to the following dimensions:



Anexos

- inside length of 299.9 ± 0.5 mm (11.81 ± 0.02 in.);
 - inside width of 124.5 ± 0.5 mm (4.90 ± 0.02 in.);
 - inside height of 133.5 ± 0.5 mm (5.26 ± 0.02 in.);
 - overall height of 152.5 ± 0.5 mm (6.00 ± 0.02 in.);
 - wall thickness of 6.25 ± 0.5 mm (0.25 ± 0.02 in.);
 - bottom plate length of 297.4 ± 0.5 mm (11.71 ± 0.02 in.); and
 - bottom plate width of 122.2 ± 0.5 mm (4.81 ± 0.02 in.).
- X1.4.1.4. For either laboratory-prepared or plant-produced HMA, compact three beam specimens per test in accordance with the procedure given in Sections 4.3.3.1 through 4.3.3.4. Ensure the beam specimens conform to the following dimensions: 75 ± 2 mm (3.0 ± 0.1 in.) tall by 125 mm (4.92 in.) wide by 300 mm (11.81 in.) long.
- X1.4.1.5. When performing manual rut-depth measurement for beam specimens, take initial readings at each of the five locations on the rut-depth-measurement template conforming to Section 3.1.8. Otherwise, obtain manual rut-depth measurements in accordance with Section 8.4.
- X1.4.1.6. When calculating the rut depth from manual rut-depth measurements for beam specimens, use the rut depth for all five locations to calculate the average rut depth for each of the three test positions. The APA rut depth for the HMA is the overall average rut depth for the three test positions, less any outliers as described in Section 9.2, from the three beam specimens.
- X1.4.1.7. Report that beam specimens were the type of test specimens utilized to evaluate the HMA rut depth.
- X1.5. *115-mm Cylindrical Specimens:*
- X1.5.1. Some APA users test cylindrical specimens with a specimen height of 115 mm, rather than a specimen height of 75 mm, for rut depth. NCHRP 9-17 (NCHRP Report 508) did not include cylindrical specimens with a specimen height of 115 mm as part of the research effort. Additional research is needed to compare rut depths between the two sample heights (75 mm and 115 mm) for cylindrical specimens. When utilizing cylindrical specimens with a specimen height of 115 mm in the APA, the following additional specifications are recommended:
- X1.5.1.1. The dimensions of each of the two holes in the test molds for cylindrical specimens shall be 150.0 ± 2.0 mm (5.91 ± 0.08 in.) in diameter by 115.0 ± 2.0 mm (4.53 ± 0.08 in.) tall.
- X1.5.1.2. The number and dimensions of test specimens shall be as follows: six cylindrical specimens, 150 mm (5.91 in.) in diameter by 115 ± 2 mm (4.5 ± 0.1 in.) tall.
- X1.5.1.3. Report that cylindrical specimens with a specimen height of 115 mm were the type of test specimens utilized to evaluate the HMA rut depth.
- X1.6. *Lower Target Air Void Content:*
- X1.6.1. Some APA users test cylindrical specimens compacted to 4.0 percent air voids or beam specimens compacted to 5.0 percent air voids rather than using a target air void content of 7.0 percent. When desiring a lower target air void content, beam specimens are normally compacted to 5.0 percent air voids rather than 4.0 percent due to a frequent inability to compact beam specimens to 4.0 percent.



Anexos

- X1.6.2. NCHRP 9-17 (*NCHRP Report 508*) evaluated these lower air void targets during the course of the research and found that the lower targets more closely related to field rutting performance than cylindrical and beam specimens compacted to 7.0 percent air voids. However, the vast majority of APA users utilize a target air void content of 7.0 percent.
- X1.6.3. When utilizing cylindrical specimens compacted to 4.0 percent air voids or beam specimens compacted to 5.0 percent air voids, the following additional specifications are recommended:
- X1.6.3.1. When producing either laboratory-prepared or plant-produced HMA specimens using an SGC, compact cylindrical specimens conforming to the dimensional requirements of Section 4.1 or Section X1.5.1.2 to 4.0 ± 0.5 percent air voids in accordance with T 312.
- X1.6.3.2. When producing either laboratory-prepared or plant-produced HMA specimens using a vibratory compactor, compact cylindrical specimens conforming to the dimensional requirements of Section 4.1 or Section X1.5.1.2 to 4.0 ± 0.5 percent air voids. Alternatively, compact beam specimens conforming to the dimensional requirements of Section X1.4.1.4 to 5.0 ± 0.5 percent air voids. In both cases, compact the specimens in accordance with the procedure given in Sections 4.3.3.1 through 4.3.3.4.
- X1.7. *Higher Wheel Load and Hose Pressure:*
- X1.7.1. Some APA users test specimens using a wheel load of 534 N (120 lbf) and a hose pressure of 830 kPa (120 psi) rather than 445 N (100 lbf) and 690 kPa (100 psi), respectively. NCHRP 9-17 (*NCHRP Report 508*) evaluated the higher load and pressure during the course of the research. However, the vast majority of APA users utilize a wheel load of 445 N (100 lbf) and a hose pressure of 690 kPa (100 psi) when testing APA specimens. Additional research is needed to compare rut depths between the two loading conditions. When utilizing a wheel load of 534 N (120 lbf) and a hose pressure of 830 kPa (120 psi), the following additional specifications are recommended:
- X1.7.1.1. Set the hose pressure gage reading to 830 ± 35 kPa (120 ± 5 psi). Set the load cylinder pressure reading for each wheel to achieve a load of 534 ± 22 N (120 ± 5 lbf).
- X1.7.1.2. Report that a wheel load of 534 N (120 lbf) and a hose pressure of 830 kPa (120 psi) were utilized to evaluate the HMA rut depth.
- X1.7.1.3. When calibrating the APA wheel load, after the load cell has been properly centered, adjust the pressure in the cylinder to obtain 534 ± 5 N (120 ± 1 lbf). Otherwise, calibrate the APA wheel load for each test position in accordance with Section A1.4. Use the current cylinder pressures to set the wheel loads to 534 N (120 lbf) as described in Section A1.4.1.15.
- X1.7.1.4. When checking the APA hose pressure, ensure that the pressure does not fluctuate outside of the range of 830 ± 35 kPa (120 ± 5 psi) during normal operation. If necessary, adjust the pressure with the hose-pressure regulator.

¹ Approved in November 2002, this standard was first published in July 2003 and was revised in 2007.



AASHTO TP 324-04

Standard Method of Test for

Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA)

AASHTO Designation: T 324-04



1. SCOPE

- 1.1. This test method describes a procedure for testing the rutting and moisture-susceptibility of hot-mix asphalt (HMA) pavement samples in the Hamburg Wheel-Tracking Device.
- 1.2. The method describes the testing of submerged, compacted HMA in a reciprocating rolling-wheel device. This test provides information about the rate of permanent deformation from a moving, concentrated load. A laboratory compactor has been designed to prepare slab specimens. Also, the Superpave® Gyrotory Compactor (SGC) has been designed to compact specimens in the laboratory. Alternatively, field cores of large diameter, 255 mm (10 in.) or 300 mm (12 in.), or saw-cut slab specimens may be tested.
- 1.3. The test method is used to determine the premature failure susceptibility of HMA due to weakness in the aggregate structure, inadequate binder stiffness, or moisture damage. This test method measures the rut depth and number of passes to failure.
- 1.4. The potential for moisture damage effects are evaluated since the specimens are submerged in temperature-controlled water during loading.
- 1.5. *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. REFERENCED DOCUMENTS

- 2.1. *AASHTO Standards:*
 - R 30, Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA)
 - T 166, Bulk Specific Gravity of Compacted Asphalt Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens
 - T 168, Sampling Bituminous Paving Mixtures
 - T 209, Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures
 - T 269, Percent Air Voids in Compacted Dense and Open Asphalt Mixtures
 - T 312, Preparing and Determining the Density of Hot-Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor



Anexos

3. SIGNIFICANCE AND USE

- 3.1. This test measures the rutting and moisture susceptibility of an HMA specimen.

4. SUMMARY OF METHOD

- 4.1. A laboratory-compacted specimen of HMA, a saw-cut slab specimen, or a core taken from a compacted pavement, is repetitively loaded using a reciprocating steel wheel. The specimen is submerged in a temperature-controlled water bath of 40 to 50°C (104 to 122°F) or a temperature specified for the binder being used. The deformation of the specimen, caused by the wheel loading, is measured.
- 4.2. The impression is plotted as a function of the number of wheel passes. An abrupt increase in the rate of deformation coincides with stripping of the asphalt binder from the aggregate in the HMA specimen.

5. APPARATUS

- 5.1. *Hamburg Wheel-Tracking Machine*—An electrically powered machine capable of moving a 203.2-mm (8-in.) diameter, 47-mm (1.85-in.) wide steel wheel over a test specimen. The load on the wheel is 705 ± 4.5 N (158 lb ± 1.0 lb). The wheel shall reciprocate over the specimen, with the position varying sinusoidally over time. The wheel shall make approximately 50 passes across the specimen per minute. The maximum speed of the wheel shall be approximately 0.305 m/s (1 ft/sec) and will be reached at the midpoint of the specimen.
- 5.2. *Temperature Control System*—A water bath capable of controlling the temperature within ± 1.0°C (1.8°F) over a range of 25 to 70°C (77 to 158°F). This bath shall have a mechanical circulating system to stabilize the temperature within the specimen tank.
- 5.3. *Impression Measurement System*—An LVDT device capable of measuring the depth of the impression of the wheel within 0.01 mm (0.0004 in.), over a minimum range of 0 to 20 mm (0.8 in.). The system shall be mounted to measure the depth of the impression at the midpoint of the wheel's path on the slab specimen. The impression shall be measured at least every 400 passes of the wheel. This system must be capable of measuring rut depth without stopping the wheel. This measurement must be referenced to the number of wheel passes.
- 5.4. *Wheel Pass Counter*—A non-contacting solenoid that counts each wheel pass over the specimen. The signal from this counter shall be coupled to the wheel impression measurement, allowing for the rut depth to be expressed as a function of the wheel passes.
- 5.5. *Specimen Mounting System*—A stainless steel tray that can be mounted rigidly to the machine. This mounting must restrict shifting of the specimen to within 0.5 mm (0.02 in.) during testing. The system shall suspend the specimen, allowing for free circulation of the water bath on all sides. The mounting system shall be designed to provide a minimum of 20 mm (0.8 in.) of free circulating water on all sides of the specimen.
- 5.6. *Balance*—Balance of 12,000 g capacity, accurate to 0.1 g.
- 5.7. *Ovens*—Ovens for heating aggregate and asphalt binders.



Anexos

5.8. *Superpave Gyratory Compactor*—Superpave Gyratory Compactor (SGC) and molds conforming to T 312.

5.9. *Bowls, spoon, spatula, etc.*

6. SPECIMEN PREPARATION

6.1. *Number of Test Specimens*—There shall be two test specimens prepared for each test. Specimens may either be slab specimens or cylinders.

6.2. *Laboratory-Produced HMA:*

6.2.1. Mixture proportions are batched in accordance with the desired job-mix formula.

6.2.2. The temperature to which the asphalt binder must be heated to achieve a viscosity of 170 ± 20 cSt shall be the mixing temperature. For modified asphalt binders, use the mixing temperature recommended by the binder manufacturer.

6.2.3. Dry-mix the aggregates and mineral admixture (if used) first; then add the correct percentage of asphalt binder. Mix the materials until all aggregates are thoroughly coated. (Wet-mix the aggregates if a lime slurry or other wet materials are used.)

6.2.4. Test samples shall be conditioned at the appropriate compaction temperature in accordance with the short-term conditioning procedure in R 30.

6.2.5. The temperature to which the asphalt binder must be heated to achieve a viscosity of 280 ± 30 cSt shall be the compaction temperature. For modified asphalt binders, use the compaction temperature recommended by the binder manufacturer.

6.2.6. *Laboratory Compaction of Specimens*—Specimens compacted in the laboratory shall be either compacted slab specimens or SGC specimens.

6.2.6.1. *Compacting Slab Specimens*—Material shall be compacted into slab specimens using a Linear Kneading Compactor (or equivalent) and shall be 320 mm (12.5 in.) long and 260 mm (10.25 in.) wide. A slab specimen thickness of 38 mm (1.5 in.) to 100 mm (4 in.) can be used. The slab specimen thickness shall be at least twice the nominal maximum aggregate size. Compacted slab specimen shall be cooled at normal room temperature on a clean, flat surface until the specimen is cool to the touch.

6.2.6.2. *Compacting SGC Specimens*—Material shall be compacted into specimens using an SGC according to T 312. A specimen thickness of 38 mm (1.5 in.) to 100 mm (4 in.) can be used. The specimen thickness shall be at least twice the nominal maximum aggregate size. Two 150-mm (6 in.) diameter specimens are needed. Compacted specimens shall be cooled at normal room temperature on a clean, flat surface until the specimen is cool to the touch.

6.3. *Field-Produced HMA*—Loose Mix:

6.3.1. Obtain a sample of HMA according to T 168.

6.3.2. *Laboratory Compaction of Specimens*—Specimens compacted in the laboratory shall be either compacted slab specimens or SGC specimens.



Anexos

6.3.2.1. **Compacting Slab Specimens**—Material shall be compacted into slab specimens using a Linear Kneading Compactor (or equivalent) and shall be 320 mm (12.5 in.) long and 260 mm (10.25 in.) wide. A slab specimen thickness of 38 mm (1.5 in.) to 100 mm (4 in.) can be used. The slab specimen thickness shall be at least twice the nominal maximum aggregate size. Compacted slab specimens shall be cooled at normal room temperature on a clean, flat surface until the specimen is cool to the touch.

6.3.2.2. **Compacting SGC Specimens**—Material shall be compacted into specimens using an SGC according to T 312. A specimen thickness of 38 mm (1.5 in.) to 100 mm (4 in.) can be used. The specimen thickness shall be at least twice the nominal maximum aggregate size. Compacted specimens shall be cooled at normal room temperature on a clean, flat surface until the specimen is cool to the touch.

6.4. **Field-Produced HMA**—Field Compacted (Core/Slab Specimen):

6.4.1. **Cutting**—Field cores or field slab specimens shall consist of wet saw-cut compacted specimens taken from HMA pavements. Field cores shall be 250 mm (10 in.) in diameter. Field slab specimens shall be wet saw-cut to approximately 260 mm (10.25 in.) wide and 320 mm (12.5 in.) long. A slab specimen thickness of 38 mm (1.5 in.) to 100 mm (4 in.) may be used. The height of a field core or field slab specimen is typically 38 mm (1.5 in.), but may be adjusted to fit the specimen mounting system by wet saw-cutting.

Note 1—Care should be taken to load the sample so it is level to the surface of the mold. The sample must be trimmed if it is too tall or shimmed up if it is too short (support with plaster if needed). The down pressure from the wheel is calibrated to be 705 N (158 lb) at the center, level to the top of the mold position. Even a small change in elevation will change the down pressure significantly.

7. DETERMINING AIR VOID CONTENT

- 7.1. Determine the bulk specific gravity of the specimens in accordance with T 166.
- 7.2. Determine the maximum specific gravity of the mixture in accordance with T 209.
- 7.3. Determine the air void content of the specimens in accordance with T 269. It is recommended, for laboratory-compacted specimens, that the target air void content be 7.0 ± 2.0 percent. Field specimens may be tested at the air void content at which they are obtained.

8. PROCEDURE

- 8.1. **Specimen Mounting**—Use Plaster-of-Paris to rigidly mount the specimen in the mounting trays. The plaster shall be mixed at approximately a 1:1 ratio of plaster to water. Pour the plaster to a height equal to that of the specimen so that the air space between the specimen and the tray is filled. The plaster layer underneath the specimen shall not exceed 2 mm (0.08 in.). Allow the plaster at least one hour to set. If other mounting material is used, it should be able to withstand 890 N (200 lb) of load without cracking.
- 8.2. **Selecting the Test Temperature**—The test temperature shall be selected based upon the applicable specifications.
- 8.3. Be sure the drain valve(s) is closed. Fill the wheel-tracking device with hot water until the float device floats to a horizontal position. The water temperature may vary and should be adjusted if necessary.



Anexos

-
- 8.4. When the water has reached the test temperature for 30 minutes, lower the wheels onto the specimens. Ensure that the micro-control unit's LVDT readout reads between 10 mm (0.4 in.) and 18 mm (0.7 in.). To adjust the LVDT height, loosen the two screws on the LVDT mount and slide the LVDT up or down to the desired height. Tighten the screws.
 - 8.5. Start the test.
 - 8.6. The wheel-tracking device shall shut off when 20,000 passes have occurred. The device will also shut off if the average LVDT displacement (read from the micro-control unit, not the screen) is 40.90 mm (1.6 in.) or greater for an individual specimen. Note that the screen readout subtracts the initial LVDT reading from the total displacement.
 - 8.7. Turn off the machine and the main power supply. To drain the baths, open the valve(s) beneath the tanks. Raise the wheels and remove the rutted specimens and the spacers.
 - 8.8. Clean the water baths, heating coils, wheels, and temperature probe with water and scouring pads or as per the manufacturer's recommendations. Use a wet-dry vacuum to remove particles that have settled to the bottom of the baths. Clean the filter element and spacers after every test.
 - 8.9. Turn the steel wheels after each test so the same section of the steel wheel surface is not in contact with the test specimen from test to test. This rotation will provide for even wear over the entire wheel. The test should run with a smooth movement across the test specimen.

9. CALCULATIONS

- 9.1. Plot the rut depth versus number of passes for each test. A typical plot of the output produced by the Hamburg Wheel-Tracking Device is shown in Figure 1. From this plot, obtain the following values:
Slope and intercept of the first steady-state portion of the curve.
Slope and intercept of the second steady-state portion of the curve.
- 9.2. Calculate the following test parameters: (1)
All of the test parameters below are expressed in 'Passes.'
$$\text{Stripping Inflection Point (SIP)} = \frac{\text{Intercept (second portion)} - \text{Intercept (first portion)}}{\text{Slope (first portion)} - \text{Slope (second portion)}}$$

where:
Failure Rut Depth is the specified maximum allowable rut depth for the test.



Anexos

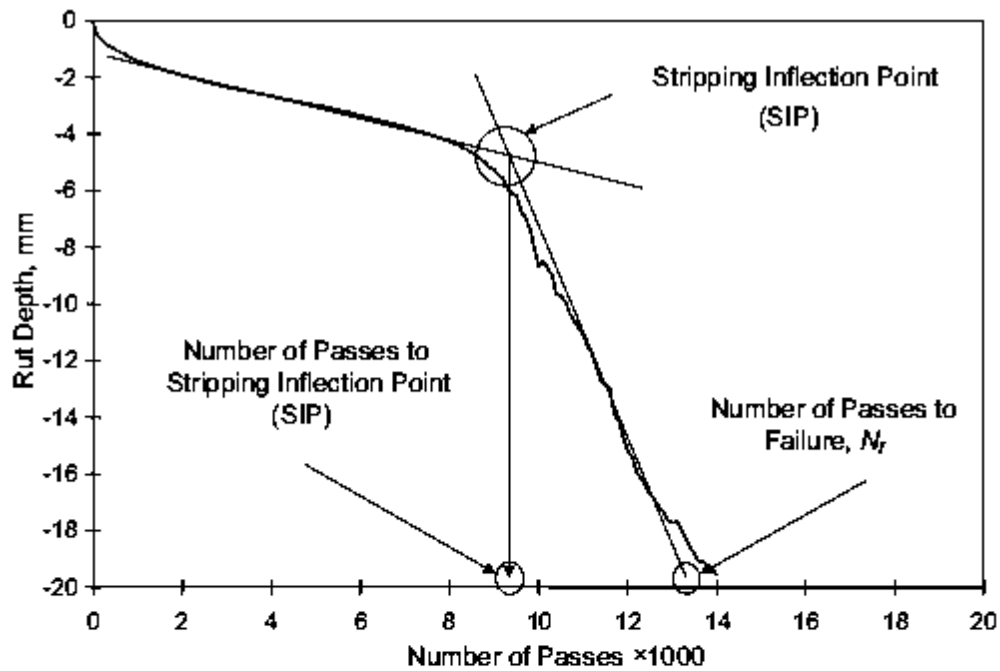


Figure 1—Hamburg Curve with Test Parameters

10. REPORT

- 10.1. *The report shall include the following parameters:*
- 10.2. HMA Production (Field or Lab);
- 10.3. Compaction method (slab or SGC specimen);
- 10.4. Number of passes at maximum impression;
- 10.5. Maximum impression;
- 10.6. Test temperature;
- 10.7. Specimen(s) air voids;
- 10.8. Type and amount of anti-stripping additive used;
- 10.9. Creep slope;
- 10.10. Strip slope; and
- 10.11. Stripping inflection point.



Anexos

11. PRECISION AND BIAS

11.1. Work is underway to develop precision and bias statements for this standard.

12. KEYWORDS

12.1. Compacted Hot-mix asphalt; moisture-susceptibility; rutting; Wheel-track testing.

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

A1. MAINTENANCE:

A1.1. All eight of the grease fittings shall be greased with fresh grease every 20 tests (not to exceed two months) per the manufacturer's recommendations.

A2. CALIBRATION/EQUIPMENT VERIFICATION

A2.1. Verify that the water bath temperature is within $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ (1.8°F) of the temperature readout on the micro-control unit every six months.

A2.2. Verify that the LVDT height is within ± 0.05 mm (0.002 in.) between the three (10, 20, and 30 mm) (0.4, 0.8, and 1.2 in.) calibration blocks.

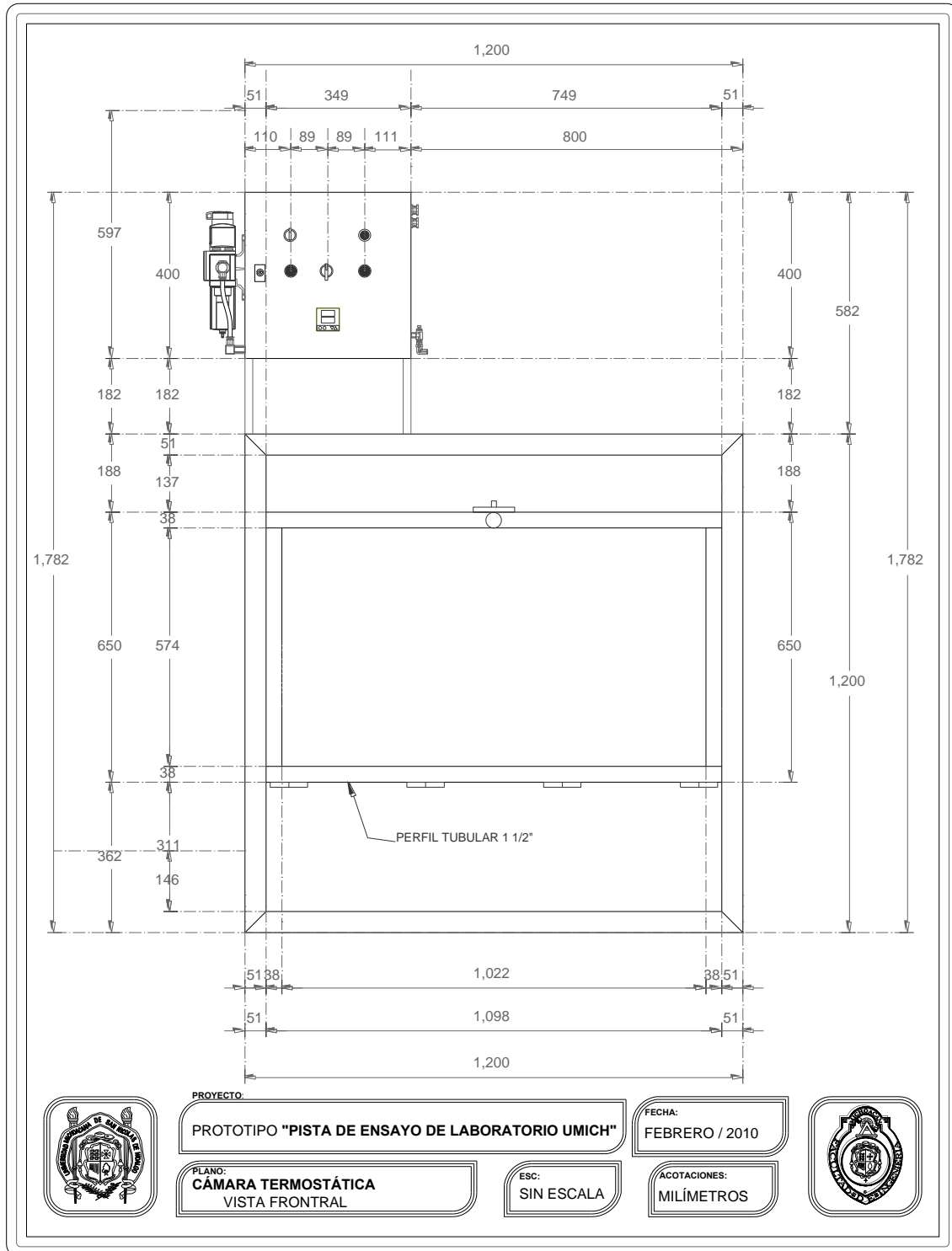
A2.3. Verify that the load on the wheel, in the middle of the stroke on the sample, at the correct level elevation, to be 705 ± 4.5 N (158 ± 1.0 lb). A calibrated load cell, accurate to 0.4 N (0.1 lb) is sufficient for this check.

A2.4. Verify that the steel wheel is reciprocating back and forth on the test sample at 50 ± 5 passes per minute.



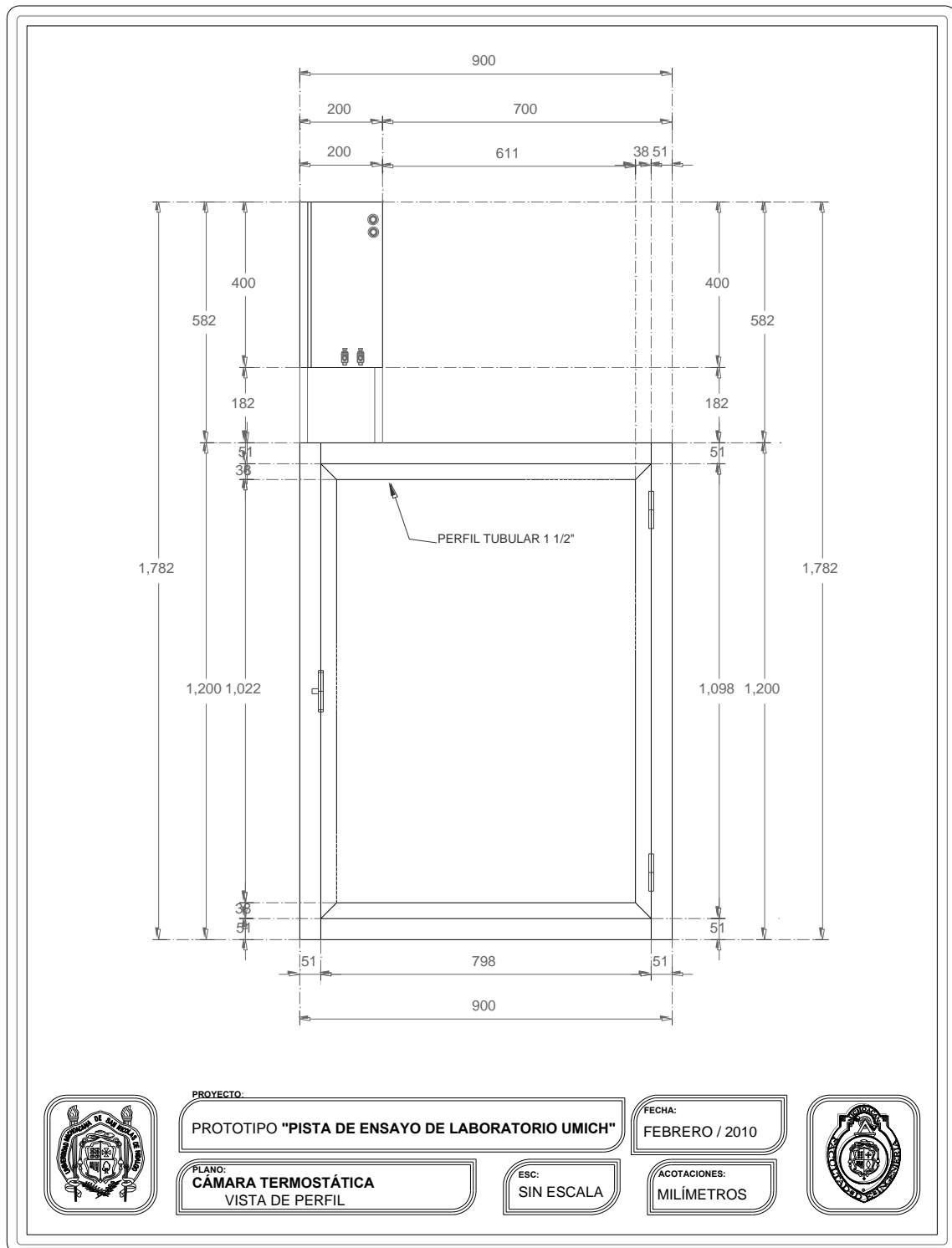
Anexos

PLANOS DEL EQUIPO



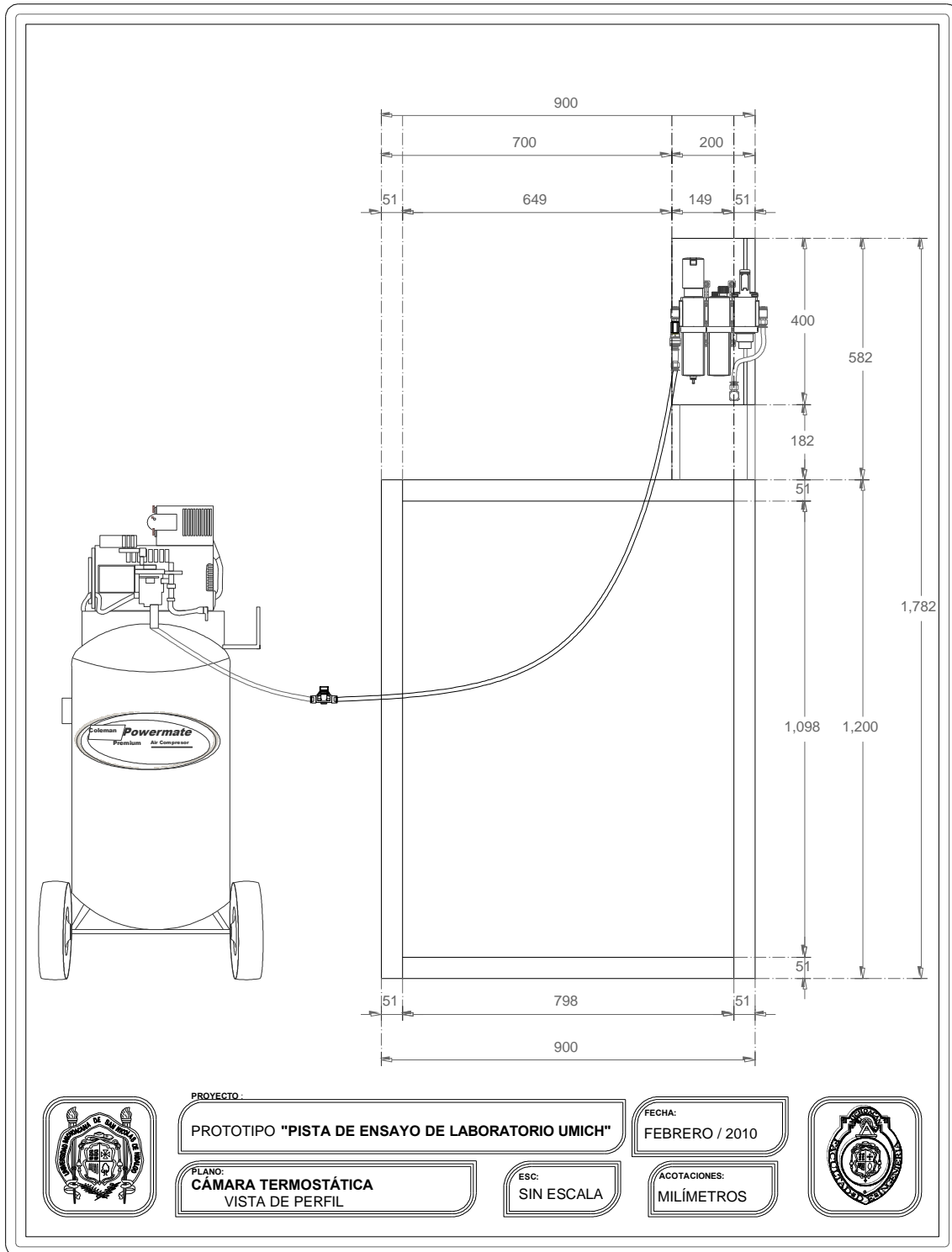


Anexos



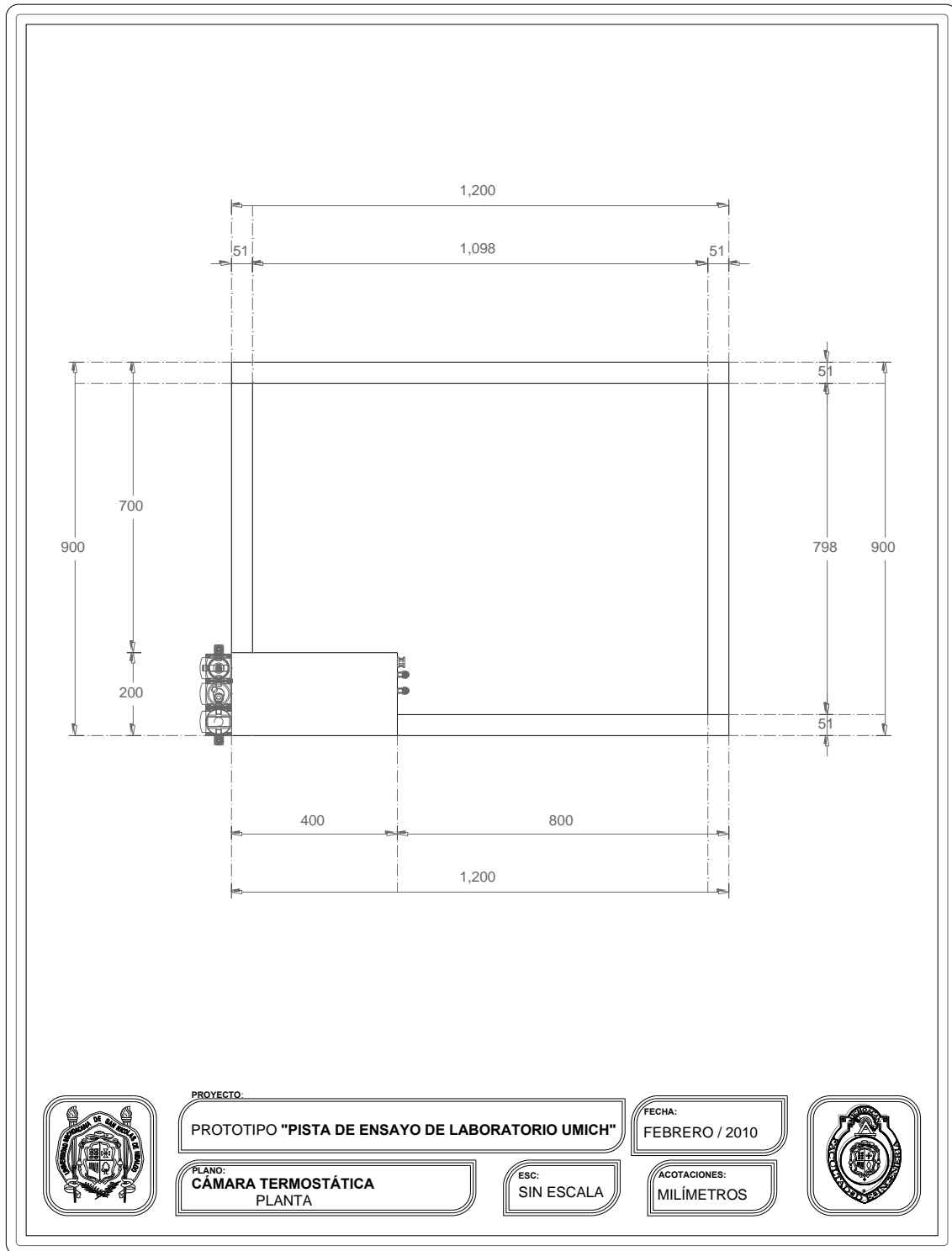


Anexos



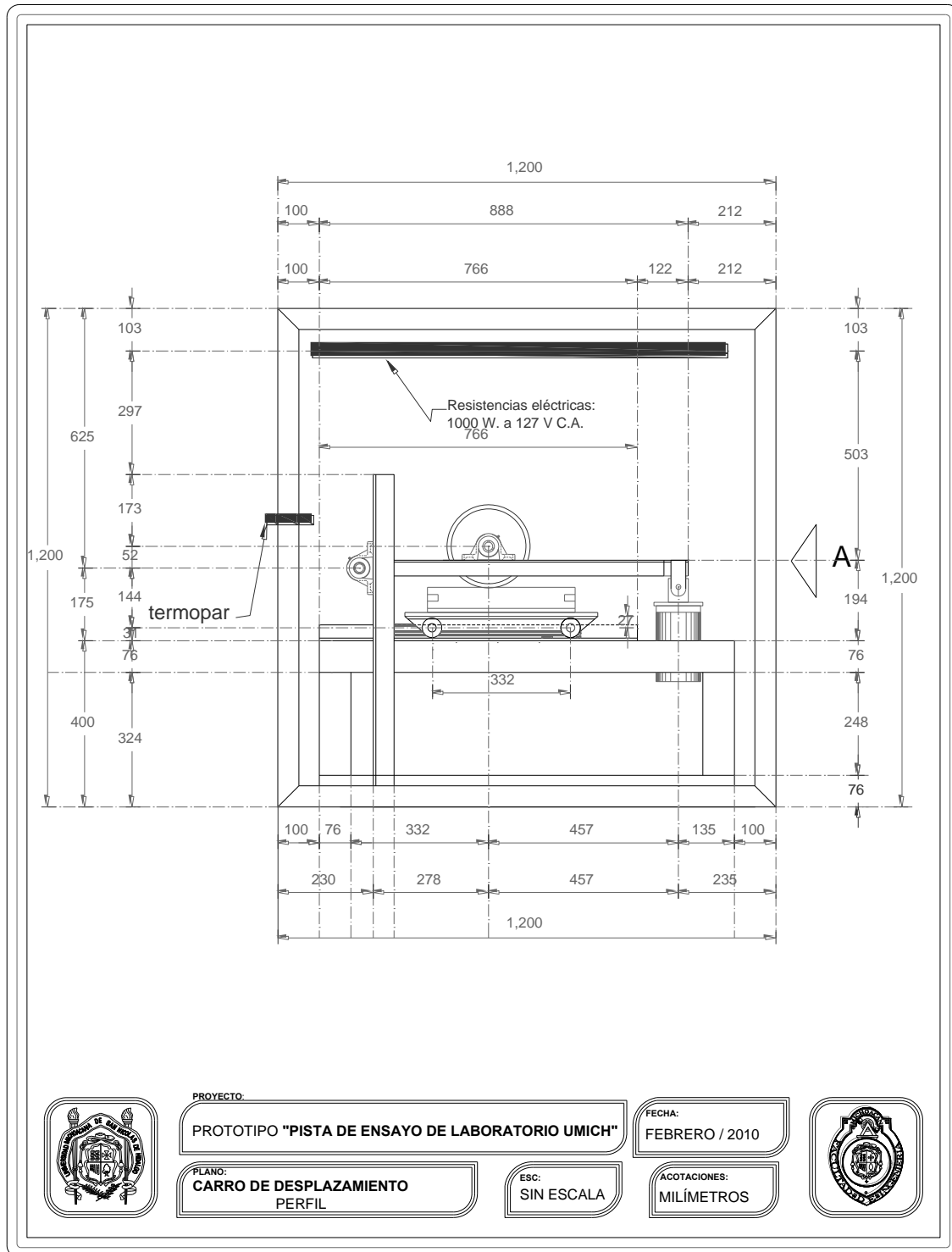


Anexos



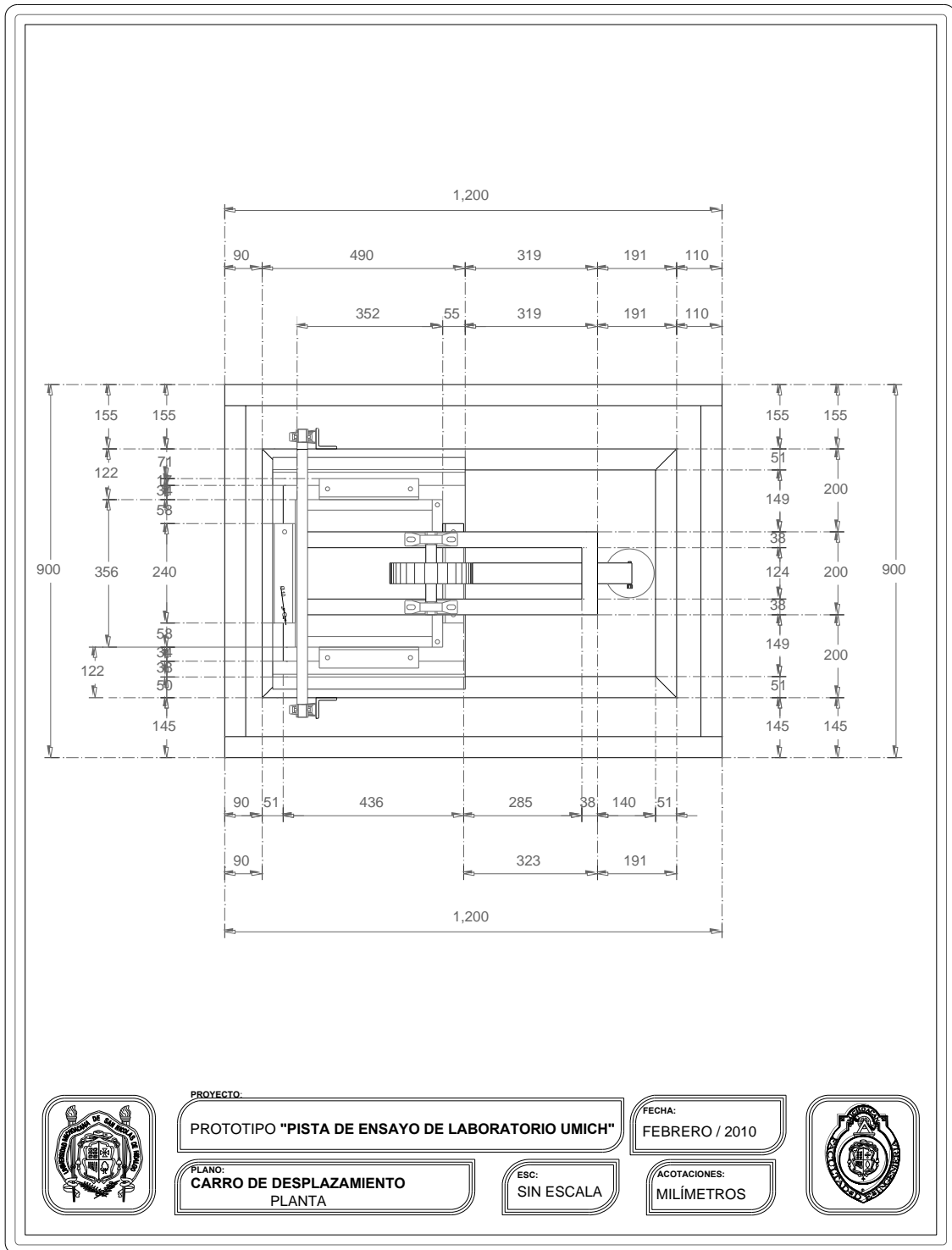


Anexos





Anexos





Anexos

