



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
GESTIÓN ADMINISTRATIVA DE LA CONSTRUCCIÓN

“EVOLUCIÓN, TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LA ACTUALIDAD Y EL FUTURO
DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EN MÉXICO.”

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
GERARDO PÓLITO ROMÁN

TUTOR:
DR. JESÚS HUGO MEZA PUESTO
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE DE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: ING. ANTONIO JESÚS COYOC CAMPOS

SECRETARIO: DR. JESÚS HUGO MEZA PUESTO

VOCAL: ING. ERNESTO RENÉ MENDOZA SÁNCHEZ

1^{er} SUPLENTE: M. I. LUIS CANDELAS RAMÍREZ

2^{do} SUPLENTE: M. I. CARLOS NARCIA MORALES

MÉXICO D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR. JESÚS HUGO MEZA PUESTO

FIRMA



AGRADECIMIENTOS:

A JACINTA TORIBIO TORRES, QUIEN HA ESTADO A MI LADO DESDE EL INICIO DE ESTE PROYECTO.

AL DR. JESÚS HUGO MEZA PUESTO, POR SU VALIOSO APOYO.

A CADA UNO DE LOS SINODALES QUE SON PARTE DE MI FORMACIÓN EN ESTE PROCESO

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

AL CONACYT POR EL APOYO QUE NOS BRINDA A TODOS LOS ESTUDIANTES.



“EVOLUCIÓN, TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LA
ACTUALIDAD Y EL FUTURO DE LOS PAVIMENTOS
FLEXIBLES EN MÉXICO.”



RESUMEN EJECUTIVO

Desde su origen hasta la actualidad, las carreteras en México han cumplido con su función principal que es la de comunicar a todo el territorio nacional. No obstante y a pesar de su buen funcionamiento, con el transcurrir del tiempo, los pavimentos van sufriendo serios deterioros en su superficie de rodamiento y subestructura, lo cual implica que los gobiernos locales y el gobierno federal anualmente destinen importantes recursos económicos para dar mantenimiento y conservación a éstas importantes vías de comunicación. La red carretera de México es muy extensa y está constituida principalmente por pavimentos flexibles y en menor porcentaje por pavimentos rígidos. Es aquí donde se centra el tema de investigación. Debido al auge que actualmente tienen los pavimentos rígidos por su “mayor resistencia”, poco a poco van ganando mayor terreno frente a los pavimentos flexibles, entre los cuales se han realizado estudios y comparaciones y se han establecido ciertas ventajas de los pavimentos de concreto hidráulico sobre los pavimentos de concreto asfáltico.

En este trabajo de investigación se pretende demostrar que lejos de ser obsoletos, los pavimentos flexibles todavía tienen muchas ventajas sobre los pavimentos rígidos. En el estudio realizado se exponen el origen de los pavimentos de concreto asfáltico, la evolución que han logrado con el paso de los años y se presentan algunas aplicaciones tecnológicas que pueden ser compatibles con este tipo de pavimentos, las cuales pueden ser el futuro de las carreteras en el mundo y en México. La intención de este trabajo es dar el reconocimiento que todavía merecen los pavimentos flexibles sin restar importancia a los rígidos, pero resaltar que todavía tienen mucho que ofrecer al sector de las carreteras en México.

Palabras clave: Pavimentos, Flexibles, Evolución, Diseño, Futuro.



ABSTRACT

Since its inception until today, the roads in Mexico has fulfilled its main function is to communicate to the entire national territory. However, despite its good performance, with the passage of time, the pavements are suffering serious damage to its rolling surface and substructure, which implies that local governments and the federal government annually devote significant financial resources to maintain and conservation these important roads. Mexico's road network is extensive and is mainly made up of flexible and rigid pavements lower percentage pavements. This is where the research topic focuses. Due to the boom currently have rigid for its "greater resistance" pavements, they are slowly gaining ground against most flexible pavements, among which there have been studies and comparisons and established certain advantages of hydraulic concrete pavements on asphalt concrete pavements.

In this research is to demonstrate that far from being obsolete, flexible pavements still have many advantages over rigid pavements. In the study the origin of asphalt concrete pavements exposed, the developments that have been achieved over the years and some technological applications that can support this type of flooring, which can be the future of the present roads in the world and in Mexico. The intention of this work is the recognition that deserve still flexible pavements without downplaying rigid, but note that they still have much to offer the road sector in Mexico.

Keywords: Pavement, Flexible, Evolution, Design, Future.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	V
ABSTRACT	VI
INTRODUCCIÓN	17
1 CAPITULO I.- EVOLUCIÓN DE LOS PAVIMENTOS EN MÉXICO	21
1.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO	21
1.2 HISTORIA DE LAS CARRETERAS EN MEXICO, DESDE LOS AZTECAS HASTA EL SIGLO XX.	22
1.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES Y TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN.	27
1.2.2 CONSTRUCCIÓN DEL CAMINO REAL EN EL VALLE DE OJOCALIENTE, ZACATECAS.	28
1.3 ORIGEN E INCORPORACIÓN DEL ASFALTO COMO ELEMENTO CONSTRUCTIVO EN LOS PAVIMENTOS.	32
1.4 EL SURGIMIENTO DE LAS CARRETERAS EN MÉXICO.	34
1.4.1 LA IMPORTANCIA DE LA INFRAESTRUCTURA.	35
1.4.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE MÉXICO.	36
1.4.1.2 LA INVERSIÓN EN CARRETERAS.....	36
1.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	38
2. CAPÍTULO II.- LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES DE MÉXICO EN LA ACTUALIDAD	40
2.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO	40
2.2 LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES	41
2.3 PROCESO CONSTRUCTIVO DE TERRACERÍAS Y PAVIMENTOS	43
2.3.1 TERRACERÍAS.....	44
2.3.2 GEOSINTÉTICOS	45
2.3.3 MEZCLADO DE MATERIALES PARA HACER UNA GRAVA CEMENTADA.....	46



2.3.4 CONSTRUCCIÓN DE LA SUBBASE.....	47
2.3.5 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE.....	47
2.3.6 MEDICIÓN DE LA COMPACTACIÓN.....	48
2.3.7 CONSTRUCCIÓN DE LA CARPETA.....	49
2.4 EL ASFALTO.....	50
2.4.1 PROPIEDADES.....	50
2.4.2 ASFALTOS OBTENIDOS DEL PETRÓLEO.....	50
2.4.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTACIÓN.....	52
2.5 DETERIOROS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	56
2.5.1 DESPRENDIMIENTOS.....	56
2.5.2 DEFORMACIONES.....	59
2.5.3 ROTURAS.....	61
2.5.4 VARIOS.....	64
2.6 INDICADORES ACTUALES DEL SECTOR CARRETERO EN MÉXICO.....	66
2.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	72
3 CAPÍTULO III.- MÉTODOS DE DISEÑO CONSIDERADOS ACTUALMENTE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	74
3.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO.....	74
3.2 MÉTODO DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM.....	76
3.3 MÉTODO DE DISEÑO ESPAÑOL MOPU - SECCIONES DE PAVIMENTO.....	81
3.3.1 TRÁNSITO.....	81
3.3.2 SUBRASANTE.....	83
3.3.3 MATERIALES PARA CAPAS SUPERIORES.....	84
3.4 MÉTODO DE DISEÑO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO DE LOS EUA.....	86
3.4.1 ESTIMACIÓN DEL TRÁNSITO.....	86
3.4.2 EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES.....	90
3.4.3 CÁLCULOS DE ESPESORES DE DISEÑO.....	94
3.5 MÉTODO DE LA AASHTO PARA EL DISEÑO DE LA SECCIÓN ESTRUCTURAL DE LOS PAVIMENTOS.....	95
3.5.1 MÉTODO DE DISEÑO.....	95
3.5.2 TRÁNSITO.....	96
3.5.3 CONFIABILIDAD “R”.....	98



3.5.4 DESVIACIÓN ESTÁNDAR GLOBAL “SO”	98
3.5.5 MÓDULO DE RESILIENCIA EFECTIVO.....	99
3.5.6 PÉRDIDA O DIFERENCIA ENTRE ÍNDICES DE SERVICIO INICIAL Y TERMINAL.....	100
3.5.7 DETERMINACIÓN DE ESPEORES POR CAPAS.....	101
3.5.8 ANÁLISIS DEL DISEÑO FINAL CON SISTEMA MULTICAPA.....	103
3.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	105
4 CAPÍTULO IV.- TECNOLOGÍAS APLICADAS ACTUALMENTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	107
4.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO	107
4.2 EL SISTEMA DE SELLADO Y CARPETA DELGADA SUPERFICIAL ALTAMENTE ADHERIDA (CASAA).....	108
4.2.1 PROCESO CONSTRUCTIVO.....	109
4.2.1.1 ESPECIFICACIONES PRELIMINARES.....	109
4.2.1.2 APLICACIÓN.....	109
4.2.1.3 COMPACTACIÓN	110
4.3 ASFALTO ESPUMADO Y DISEÑO DE MEZCLA.....	111
4.3.1 DISEÑO DE LA MEZCLA	113
4.3.2 APLICACIONES DEL ASFALTO ESPUMADO	116
4.4 PAVIMENTACIÓN CON GEOSINTÉTICOS.....	118
4.4.1 FUNCIONES DEL GEOTEXTIL.....	118
4.4.2 FUNCIONES DE LA GEOMALLA DE FIBRA DE VIDRIO.....	119
4.4.3 PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN	119
4.4.3.1 CONDICIONES Y LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE.....	120
4.4.3.2 TRATAMIENTO DE FISURAS	120
4.4.3.3. LIGANTE ASFÁLTICO	120
4.4.3.4 TEMPERATURAS DE TRABAJO.....	121
4.4.3.5 INSTALACIÓN DEL GEOSINTÉTICO	121
4.5 PAVIMENTOS TIPO STONE MASTIC ASPHALT (SMA).....	123
4.5.1 TENDIDO DEL SMA.....	124
4.5.1.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS	124
4.5.1.2 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE.....	124



4.5.1.3 EXTENDIDO	124
4.5.1.4 COMPACTACIÓN	125
4.5.1.5 APERTURA AL TRÁFICO	125
4.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	126
5 CAPÍTULO V.- EL FUTURO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EN MÉXICO	128
5.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO	128
5.2 PAVIMENTOS SOSTENIBLES	129
5.2.1 ELEMENTOS Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	132
5.3 NANOTECNOLOGÍA EN PAVIMENTOS	134
5.3.1 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS	138
5.4 PAVIMENTOS INTELIGENTES.....	140
5.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FIBRA	141
5.4.1.1 ÓPTICA-GEOTEXTIL	141
5.4.1.2 PRUEBAS DE LABORATORIO.....	143
5.4.1.3 PRUEBAS Y APLICACIONES IN SITU.....	144
5.5 CALLE INTELIGENTE / CALLE WIFI	147
5.5.1 INTEGRACIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	148
5.5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	150
5.5.3 PIEZA DE PAVIMENTO INTELIGENTE	150
5.5.4 APLICACIONES ACTUALES PARA LA CALLE INTELIGENTE	151
5.5.5. PROCESO CONSTRUCTIVO	153
5.5.5.1. FASES DE EJECUCIÓN	153
5.5.5.2. PREPARACIÓN DEL SOPORTE.....	154
5.5.5.3. COLOCACIÓN DE PIEZAS.....	154
5.5.5.4. CONDICIONES DE TERMINACIÓN	155
5.6 PAVIMENTOS SOLARES	156
5.6.1 EXPERIMENTOS PIONEROS	160
5.7 PAVIMENTOS VERDES (PAVEGEN).....	161
5.7.1. LA ENERGÍA DE LAS PISADAS.....	162
5.7.2. NUEVAS APLICACIONES DE UN ANTIGUO CONCEPTO.....	163
5.7.3. EFECTO PIEZOELÉCTRICO	164



5.7.4. TIPOS DE ACTUADORES PIEZOELECTRICOS	164
5.7.4.1. ACTUADOR TIPO PILA.....	164
5.7.4.2. ACTUADORES “FLEXURE”	165
5.7.4.3. PIEZO ACTUADORES COMBINADOS CON SISTEMA DE POSICIONAMIENTO MOTORIZADO DE AMPLIO RANGO.....	166
5.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	168
CONCLUSIONES GENERALES.....	169
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y DE CONSULTA.....	173
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
ANEXO 1	176



ÍNDICE DE FIGURAS

MEXICO-TENOCHTITILAN RECONSTRUCCIÓN ESQUEMÁTICA 1325-1519.....	23
FIGURA 1.1. EMPEDRADO DEL CAMINO REAL. PUEDEN APRECIARSE LOS NIVELES Y EL BOMBEO.	29
FIGURA 1.2. PERFIL DE LA PENDIENTE SURESTE-NOROESTE DE UN TRAMO DEL CAMINO Y PERFIL ESTRATIGRÁFICO.	30
FIGURA 2.1- ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO RÍGIDO.....	41
FIGURA 2.2- ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.....	41
FIGURA 2.3.1- MOVIMIENTO DE TIERRAS.....	44
FIGURA 2.3.2- COLOCACIÓN DE GEOSINTÉTICO.....	45
FIGURA 2.3.3.- TENDIDO DE GRAVA CEMENTADA SOBRE LA SUBRASANTE.....	46
FIGURA 2.3.4- TENDIDO Y COMPACTACIÓN DE LA SUBBASE.....	47
FIGURA 2.3.5- TENDIDO DE LA BASE.....	48
FIGURA 2.3.6- COMPACTACIÓN.....	48
FIGURA 2.3.7- TENDIDO DE LA CARPETA ASFÁLTICA.....	49
FIGURA 2.3.8- PAVIMENTO FLEXIBLE.....	49
FIGURA 2.4 – DIAGRAMA DE FABRICACIÓN DE LOS PRODUCTOS ASFÁLTICOS ...	51
FIGURA 2.5 – PRODUCTOS ASFÁLTICOS LÍQUIDOS.....	52
NOTA: LAS DIMENSIONES DE ESTOS DIAGRAMAS NO SON PROPORCIONALES A LA COMPOSICIÓN.....	52
FIGURA 2.6 – COMPOSICIÓN DEL SISTEMA CARRETERO MEXICANO.....	67
FUENTE: SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT).....	67
FIGURA 2.9 – ESTADO SUPERFICIAL DE LA RED DEL SISTEMA CARRETERO MEXICANO.....	67
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT).....	67
FIGURA 2.10 – PRINCIPALES CORREDORES CARRETEROS.....	68
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT).....	68
FIGURA 2.16 – MESORREGIONES EN QUE ESTÁ DIVIDIDO EL PAÍS.....	69
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT).....	69
FIGURA 2.17 – INVERSIÓN PÚBLICA Y PRIVADA EN INFRAESTRUCTURA CARRETERA.....	70
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT).....	70
FIGURA 2.18 – INVERSIÓN EN CARRETERAS.....	71
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT).....	71
FIGURA 3.5. FACTOR DE AJUSTE DE LOS EJES EQUIVALENTES POR PRESIÓN DE LA LLANTA.....	90
FIGURA 4.1- COMPACTACIÓN DE CARPETA ASFÁLTICA (CASAA).....	110
FIGURA 4.3. CÁMARA DE EXPANSIÓN.....	111
FIGURA 4.4.- PROCESO DEL ASFALTO ESPUMADO.....	112
FIGURA 4.5. CLASIFICACIÓN DE MATERIALES GRANULARES.....	114
FIGURA 4.6.- COLOCACIÓN DE GEOTEXTIL.....	118
FIGURA 4.7. COLOCACIÓN DE GEOMALLA EN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.....	119



FIGURA 4.8.- INSTALACIÓN DEL GEOSINTÉTICO	122
FIGURA 4.9.- ESTRUCTURA DE UN SMA.	123
FIGURA 5.1. SISTEMA SERSO (SUIZA)	131
FIGURA 5.3. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO EN VERANO (IZDA.) E INVIERNO (DCHA.) DEL COLECTOR ASFÁLTICO RES (FUENTE: OOMS AVENHORN)	132
FIGURA 5.4. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA PAS	133
REACCIÓN DEL NOX AL ENTRAR EN CONTACTO CON EL TIO2.....	135
FIGURA 5.5: IMÁGENES DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DE ESPUMAS DE POLIESTIRENO MACROPOROSAS, SINTETIZADAS A PARTIR DE EMULSIONES ALTAMENTE CONCENTRADAS.	135
FIGURA 5.6: IMÁGENES DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DE TIO2.	136
FIG. 5.7 - MECANISMO DE REACCIÓN Y DEGRADACIÓN DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO EN PRESENCIA DEL FOTOCATALIZADOR TIO2.	137
FIGURA 5.8 - DESCRIPCIÓN Y EJECUCIÓN DE TÉCNICA DE PULVERIZACIÓN SOBRE RODADURA EXISTENTE Y ESTADO FINAL DE LA MISMA DESPUÉS DE LA APLICACIÓN.	139
SENSORES ASG (ASPHALT STRAIN GAGES).....	140
GEOTEXTIL CON SENSORES INTEGRADOS	141
FIGURA 5.9. ESTRUCTURA DE LA FIBRA ÓPTICA CON DOS SENSORES FBG.....	142
FIGURA 5.10. DETALLE DE LA FIBRA ÓPTICA INSERTADA EN EL GEOTEXTIL.....	143
FIGURA 5.11. COMPACTACIÓN DE LA CARPETA	145
SEÑAL DE INTERNET INALÁMBRICA INTEGRADA A LOS PAVIMENTOS APROVECHADA EN APLICACIONES.....	147
EL PROPÓSITO DE LA CALLE INTELIGENTE ES LOGRAR LA INTERCOMUNICACIÓN ENTRE LOS USUARIOS DE LAS CARRETERAS A TRAVÉS DE SEÑALES INALÁMBRICAS.	148
DISPOSITIVO ELECTRÓNICO INTEGRADO AL PAVIMENTO. EMITE SEÑALES INALÁMBRICA A LOS DISPOSITIVOS FIJOS O MÓVILES CERCANOS	149
PIEZA DE PAVIMENTO CON DISPOSITIVO HOSTPOT IPAVEMENT INTEGRADO	150
INSTALACIÓN DE DISPOSITIVOS IPAVEMENT EN PAVIMENTO	151
CALLE INTELIGENTE IPAVEMENT.....	151
FIGURA 5.12. PROYECTO DE CARRETERA SOLAR.....	156
FIGURA 5.13. PANEL SOLAR A BASE DE PLACA DE VIDRIO	157
FIGURA 5.14. EQUIPO DE RECEPCIÓN DE ONDAS INDUCTORAS.....	158
PAVIMENTO SOLAR	159
FIG. 5.15 – DIMENSIONES DEL BLOQUE DE PAVIMENTO PAVEGEN	161
GENERACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA CON LAS PISADAS A LA GENTE	163
FIGURA 5.16 – DISEÑO DE UN ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO TIPO PILA	165
FIGURA 5.17 – NANOPOSICIONADOR TIPO “FLEXURE” Y SCANNER CON AMPLIFICADOR DE MOVIMIENTO INTEGRADO.....	166
FIGURA 5.18 – COMBINACIÓN DE UN PIEZO ACTUADOR Y UN TORNILLO MOTORIZADO.	166



FIGURA 3.1 EJEMPLO RELACIONES PESO VOLUMÉTRICO SECO – CONTENIDO DE AGUA - VRS, PARA UN SUELO ARCILLOSO.	178
FIGURA 3.2 CÁLCULO DEL TRÁNSITO EQUIVALENTE ACUMULADO (ΣL).	179
FIGURA 3.3. GRÁFICA PARA DISEÑO ESTRUCTURAL DE CARRETERAS CON PAVIMENTO FLEXIBLE.	180
FIGURA 3.4. GRÁFICA PARA DISEÑO ESTRUCTURAL DE CARRETERAS CON PAVIMENTO FLEXIBLE.	181
FIGURA 3.6. GRÁFICA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE UNA SOLA CAPA (7°C).	185
FIGURA 3.7. GRÁFICA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE UNA SOLA CAPA (15.5°C).	186
FIGURA 3.8. GRÁFICA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE UNA SOLA CAPA (24°C).	187
FIGURA 3.9. GRÁFICA DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE.	188
FIGURA 3.10.- VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CAPA “A2”, EN BASES GRANULARES.	189
FIGURA 3.11.- VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CAPA “A3”, EN SUBBASES GRANULARES.	190
FIGURA 3.12.- VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CAPA “A2”, EN BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO PORTLAND.	191
FIGURA 3.13.- VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CAPA “A2”, EN BASES ESTABILIZADAS CON ASFALTO.	192
FIGURA 3.14.- FORMATO PARA CALCULAR EL MÓDULO DE RESILIENCIA EFECTIVO DE LA SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.	193



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1. VALOR RELATIVO DE SOPORTE CRÍTICO ESTIMADO PARA EL DE PAVIMENTOS, PARA SUBRASANTES COMPACTADAS 95% DEL VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO PROCTOR.	76
TABLA 3.2. EJEMPLO DE COMPOSICIÓN VEHICULAR CON PORCENTAJES DE CARGADOS Y VACÍOS.	78
TABLA 3.3. CATEGORÍAS DE TRÁNSITO PESADO.	82
TABLA 3.4. MATERIALES UTILIZABLES EN SUBRASANTES.	83
TABLA 3.5. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTO PARA “T 0”.	182
TABLA 3.6. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTO PARA “T 1”.	182
TABLA 3.7. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTO PARA “T 2”.	183
TABLA 3.8. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTO PARA “T 3”.	183
TABLA 3.9. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTO PARA “T 4”.	184
TABLA 3.10. TASA ANUAL DE CRECIMIENTO DEL TRÁNSITO.	87
TABLA 3.11. PORCENTAJE DE CAMIONES EN EL CARRIL DE DISEÑO.	88
TABLA 3.12. FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA.	88
TABLA 3.13. VALOR PERCENTIL PARA DISEÑO DE SUBRASANTE, DE ACUERDO AL NIVEL DEL TRÁNSITO.	91
TABLA 3.14. VALORES PARA DIFERENTES PRUEBAS, CON MATERIALES DE BASES Y SUBBASES.	92
TABLA 3.15. VALORES RECOMENDADOS POR EL I.M.T.	92
TABLA 3.16. GRADOS DE ASFALTO DE ACUERDO AL TIPO DE CLIMA.	93
TABLA 3.17. ESPESORES MÍNIMOS DE CARPETA ASFÁLTICA, DE ACUERDO AL NIVEL DEL TRÁNSITO.	93
TABLA 3.18. ESPESORES DE SUPERFICIE DE CONCRETO ASFÁLTICO SOBRE BASES GRANULARES SIN ESTABILIZAR.	94
TABLA 3.19. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL.	97
TABLA 3.20. PERIODOS DE DISEÑO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CARRETERA.	97
TABLA 3.21. VALORES DE “R” DE CONFIABILIDAD, CON DIFERENTES CLASIFICACIONES FUNCIONALES.	98
TABLA 3.22. CAPACIDAD DEL DRENAJE PARA REMOVER LA HUMEDAD.	102
TABLA 3.23.- VALORES <i>M</i> /RECOMENDADOS PARA MODIFICAR LOS COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA DE BASES Y SUBBASES SIN TRATAMIENTO, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.	102
TABLA 3.24. ESPESORES MÍNIMOS, EN PULGADAS, EN FUNCIÓN DE LOS EJES EQUIVALENTES.	103
TABLA 4.1. RECOMENDACIONES PARA LA INCORPORACIÓN DE CEMENTO A LA MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO.	114





INTRODUCCIÓN

En México el sector carretero es muy importante ya que forma parte de la infraestructura nacional y también funciona como indicador económico a nivel internacional. Siendo a su vez un importante tema de estudio, los pavimentos flexibles, con los cuales se construye el mayor porcentaje de tramos carreteros del país. Sin embargo, en los últimos años estos pavimentos están siendo sustituidos por los pavimentos rígidos, por ser considerados de mayor resistencia y duración. Sin embargo, existen muchas tecnologías y aplicaciones que se pueden implementar a los pavimentos de concreto asfáltico y que pueden mejorar su diseño y estructura, ofreciendo un mejor producto para el desempeño de las carreteras. No obstante, en el país no se ha mostrado mucho interés por implementar nuevas tecnologías que mantengan a la vanguardia las carreteras y hacerlas más eficientes, tal vez porque todavía falta ofrecer más información y divulgación sobre las ventajas y beneficios que ofrecen los productos y diseños para pavimentos asfálticos de nueva generación.

El principal objetivo del presente trabajo consistirá en obtener toda la información necesaria sobre los pavimentos flexibles para exponer su historia, evolución y ventajas que todavía tienen sobre los pavimentos rígidos, así como también para presentar diseños que todavía no se realizan en México pero que en algunos países se encuentran en proceso de investigación y desarrollo y en otros ya son una realidad, esto con la finalidad de que sean realmente considerados en la construcción de las carreteras del país; los pavimentos del futuro.

Como consecuencia de la notable desventaja, cada vez mayor, que actualmente tienen los pavimentos flexibles de los rígidos, surge la necesidad de realizar este trabajo de investigación para exponer la funcionalidad y amplia gama de diseños que existen para este tipo de pavimentos con el objetivo de asegurar su uso y permanencia en la construcción de las carreteras de México.



Con la información obtenida, se expondrá el origen, evolución y las nuevas aplicaciones que existen para los pavimentos flexibles y se conseguirá demostrar la importancia que han tenido en toda la historia desde su concepción hasta la actualidad, despertando el interés general de muchos investigadores en el tema de pavimentos flexibles para poder promover la aplicación de tecnologías que sean realmente aplicables en México y puedan construirse con el apoyo del gobierno y particulares.

El presente trabajo es una investigación cien por ciento documental y las fuentes de investigación fueron obtenidas de publicaciones escritas, como libros y revistas, artículos en páginas de internet y una extensa bibliografía señalada al final de este trabajo. Es importante aclarar que esta investigación no tiene la finalidad de lucrar con la información presentada, uno de sus objetivos es servir como una referencia más para futuros estudios respecto al tema. Se da el reconocimiento a todos y cada uno de los autores así como a las fuentes electrónicas.

Esta investigación se divide en cinco capítulos en los cuales se exponen las características principales de los pavimentos flexibles. En los primeros dos capítulos se presenta el estudio realizado sobre el origen y evolución de los pavimentos con la finalidad de conocer las causas que obligaron a los pobladores a construir caminos y también los cambios que han presentado hasta llegar a sus condiciones actuales.

En los capítulos tres y cuatro, se encontrará la investigación realizada sobre los métodos de diseño para pavimentos flexibles así como algunas definiciones del asfalto y la gama de productos que se obtienen de él, para entender más a fondo el proceso constructivo y la forma de diseñar los pavimentos de hoy en día. También los deterioros que sufren y las causas que los generan, esto para tomarlos en cuenta al momento del diseño y poder establecer una mejora continua.



También se hace mención del sector carretero del país, resaltando algunos datos estadísticos muy importantes, sobre todo económicos para poder saber cuáles son las posibilidades que tiene el país de poder invertir en nuevas tecnologías, las cuales se exponen en el último capítulo.

Finalmente y como se mencionó en el párrafo anterior, en el último capítulo - con el objetivo de conocer más a fondo el infinito mundo de opciones que existen para los pavimentos flexibles - se presentan alternativas de diseño y aplicación para mejorar el desempeño de éstos y hacerlos más compatibles no solo con el entorno que los rodea y el medio ambiente, sino también, hacerlos generadores de energía a través de la interacción humana y mecánica.



CAPÍTULO I.- EVOLUCIÓN DE LOS PAVIMENTOS EN MÉXICO



1 CAPITULO I.- EVOLUCIÓN DE LOS PAVIMENTOS EN MÉXICO

1.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

En éste capítulo se darán a conocer los antecedentes históricos sobre los caminos y las vías de comunicación que existieron en nuestro país durante la civilización Azteca y la conquista Española. Se investigará la importancia que tuvieron las vías de comunicación.

Se presentará un artículo sobre un tramo construido en la época del Virreinato con la finalidad de saber cómo se construían los caminos y bajo qué criterios.

Se describirá el proceso histórico de las carreteras de México, la creación de organismos y dependencias nacionales, así como sus funciones y la necesidad de infraestructura.

Se presentará una breve cronología sobre la historia del asfalto, su paso a través del tiempo y a partir de cuándo comenzó su industrialización.

Los objetivos de éste capítulo son; el estudio de los antecedentes históricos de los pavimentos de México y su contexto en el mundo, para identificar las necesidades y los procesos constructivos que marcaron el inicio de la urbanización y el desarrollo de la infraestructura del México actual. Con la información obtenida, se identificará en qué punto de la historia de nuestro país comienza el uso de los pavimentos, la importancia que éstos tuvieron y cómo fueron evolucionando hasta llegar a la época actual.



1.2 HISTORIA DE LAS CARRETERAS EN MEXICO, DESDE LOS AZTECAS HASTA EL SIGLO XX.

Mucho antes de la llegada de los españoles a la Ciudad de México, hace más de 500 años, Tenochtitlan era una ciudad bien conformada, con sistema de drenaje, tuberías subterráneas que alimentaban con agua potable los palacios, calles, canales, calzadas y, por supuesto, contaban también con sistema de transporte.

Las cuatro calzadas principales, apuntaban a los cuatro puntos cardinales. La primera, calzada Iztapalapa, era la entrada principal que comunicaba con los pueblos del sur. La segunda se dirigía al poniente, con dirección a Tacuba. La tercera corría hacia el norte por la actual calle de Argentina y por la última, se iba al oriente por las actuales calles de Guatemala, hasta el embarcadero de Texcoco.

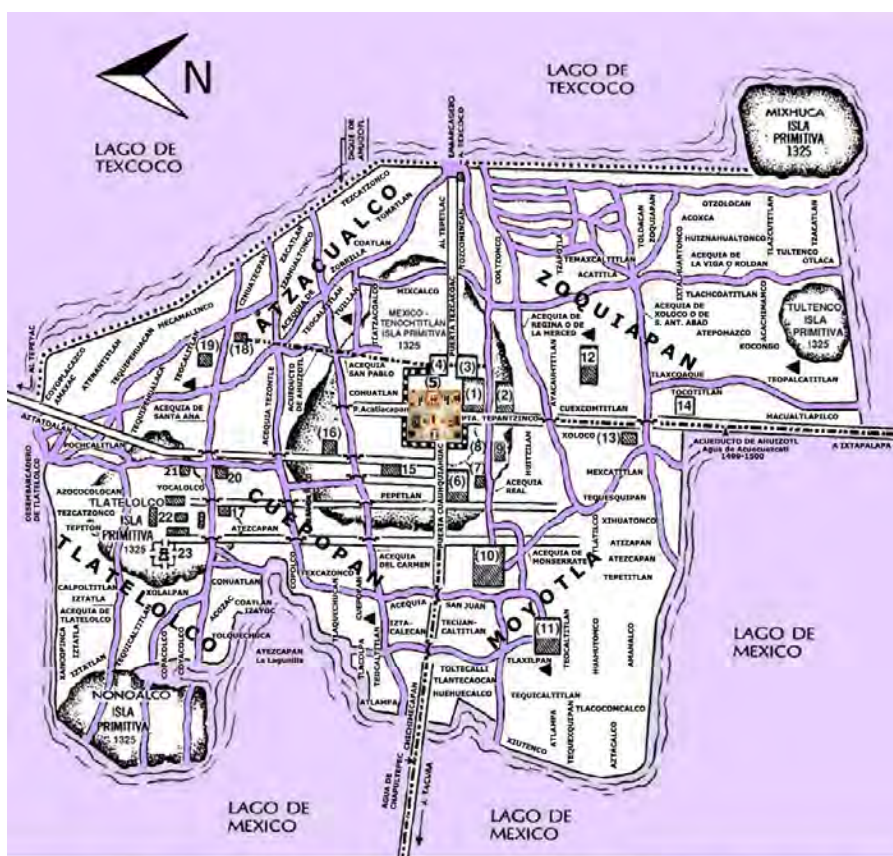
En aquella época, había tres tipos de calles, además de las calzadas, las de tierra, las de agua, que constituían el medio vial de transporte más difundido y eficaz, y las calles mixtas.

En relativamente poco tiempo, se iba consolidando el suelo y reduciendo las aguas del lago, formándose así la enorme isla para caminar grandes distancias más allá del Imperio Azteca.

Por necesidad los primeros caminos fueron de tipo peatonal que las tribus formaban en las regiones al caminar en busca de alimentos, posteriormente cuando estos grupos se volvieron sedentarios los caminos tuvieron distintas finalidades; comerciales, religiosas y de conquista. Por las calzadas, que eran hermosas y anchas, hechas de tierra dura como enladrillado, circulaban miles de paseantes, traficantes comerciantes o tamemes; estos eran los cargadores de las mercancías que llevaban sobre la espalda, sostenida con una banda de ixtle llamada Mecapal y que se apoyaba en la frente.

Con la llegada de los españoles y el inicio de la construcción de la nueva Ciudad, hacia 1522, se dio inicio al nuevo trazo urbanístico. Aunque se conservaron las cuatro parcialidades que habían establecido los aztecas, los conquistadores cambiaron sus nombres. Atzacualco cambió por San Sebastián; Zoquipan, por San Pedro; Moyotla, por San Juan y Cuecopan, por Santa María Redonda.

MEXICO-TENOCHTITLAN RECONSTRUCCIÓN ESQUEMÁTICA 1325-1519



- | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---|
| Principales Construcciones y Plazas: | 6.- Palacio de Axayacatl, | 12.- Huitznahúic, | 18.- Tlacochcoatl, (Teocalli) |
| 1.- Palacio de Moctezuma II. | 7.- Cuicacalco. | 13.- Xoloco, (Teocalli) | 19.- Apahualtlan o Azaguztlan, (Teocalli) |
| 2.- Plaza de El Volador. | 8.- Plaza Principal | 14.- Templo de Toci, (Teocalli) | 20.- Atenantitlan o Tetenamitli, (Teocalli) |
| 3.- Casa de las Aves. | 9.- Palacio del Tláncanqui. | 15.- Palacio de Capahimic. | 21.- Xoolitla o Chisatlapan. |
| 4.- Tepicocalli. | 10.- Casa de las Fieras. | 16.- Texontemacoyan, (Teocalli) | 22.- Tianguis o mercado de Tlatelolco |
| 5.- Templo Mayor. | 11.- Tianguis de Moyotla. | 17.- Palacio de Yacatlco | 23.- Templo mayor de Tlatelolca |

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| SIEMPRE: | CONSTRUCCIONES PRINCIPALES |
| — — — — — CALZADAS O CALLES DE TIERRA | ••••• DIQUE DE AHUIZOTL |
| — — — — — CANALES O ACEDIAS | ▲ TEOCALLI O TEMPLO |
| — — — — — PUENTES DE VIGAS | |

MEXICO - TENOCHTITLAN
 Reconstrucción esquemática
 1325 - 1519
 Interpretación de M. Carrera Stampa
 Según:
 A. Téllez Cirón, R.H. Barlow, A. Caso,
 J.M. Bribiesca y M.F. Alvarez.



Una vez trazado el centro, se construyeron las primeras calles: Pino Suárez, Tacuba, Madero, Brasil, Argentina, Guatemala, Moneda, Corregidora, 5 de Febrero y 16 de Septiembre. Todas fueron pavimentadas con piedras del Río Tacubaya. San Juan de Letrán y Santa Isabel que eran calles de agua, se siguieron utilizando para el tránsito de canoas.

Pronto aparecieron las carretas, la primera de ellas perteneciente a Hernán Cortés y poco después surgieron los coches y carruajes que eran tirados por caballos. Para 1648 de entre 30 mil y 40 mil habitantes que había en la Ciudad, más de la mitad poseían un vehículo de estos lo que ocasionó serios problemas de tránsito.

Con una población creciente, para principios del siglo XIX, en la ciudad se contaba ya con 160 mil habitantes y circulaba gran cantidad de vehículos. Sin embargo la Guerra de Independencia ocasionó que el país cayera en una crisis política, económica y social que no cesó hasta 1850. Las vías de comunicación se vieron seriamente afectadas y se interrumpió el tráfico de productos manufacturados y bienes de consumo.

Los canales se volvieron intransitables debido a la gran cantidad de basura que se tiraba en ellos, sin embargo, el de Chalco, que terminaba cerca del Palacio de Gobierno, se seguía empleando para la transportación de víveres a la ciudad. Subsistían las canoas y las trajineras pero los problemas en los medios de transporte repercutían en el tráfico, la minería, la hacienda pública y la agricultura.

Después de 1824, año en que se erige a la Ciudad de México como sede de los poderes, la geometría urbana había cambiado, aparecieron las primeras glorietas y cruceros aunque la intensa actividad de autos seguía ocasionando problemas de vialidad.



Para atender el problema, en 1830, se expidió el primer Reglamento de Tránsito, expedido por el gobierno de la capital. En él se establecían límites de velocidad, y se pretendía tener control sobre las tarifas y el uso de los vehículos.

El incremento en la demanda de transporte llegó a tal grado que surgió la inquietud de construir una vía de fierro. La primera concesión para una vía férrea que uniera la capital de Veracruz la otorgó el Presidente Anastasio Bustamante en 1825, a don Francisco Arrillaga.

El 12 de enero de 1858, Agustín Alcerreca, Gobernador del Distrito, expidió un nuevo reglamento, éste, para el servicio ferroviario y conservación de vías que establecía límites de velocidad, precios y capacidad de transporte de los coches.

Un año más tarde, en 1859, se introdujo a México el primer vehículo impulsado por energía eléctrica. Este servicio de tranvías se modernizó paulatinamente hasta que en diciembre de 1894 se fijaron reglas para el otorgamiento de concesiones de líneas férreas en calles, plazas y calzadas en las que se instaló un sistema de hilo aéreo.

Los tranvías viajaban a una velocidad de 10 kilómetros por hora, el parque vehicular ascendía a 30 de cuatro ruedas y había otros tantos de ocho. Poco después, llegó una remesa de tranvías de dos pisos que eran conducidos por choferes pulcramente uniformados y hacían paradas únicamente en las esquinas.

Hacia 1885 la Ciudad contaba con 300 mil habitantes y el desarrollo de vías públicas dentro del perímetro de 13 mil 500 metros, sumaban 270 kilómetros.

El primer automóvil de combustible que llegó a México, un Delaunay Belleville hecho a mano, procedente de Tolón, Francia, fue introducido a fines de

Hacia 1910 da inicio la etapa revolucionaria con el levantamiento contra el general Porfirio Díaz. Ésta época se vio apoyada por los nuevos medios de transporte, principalmente por el ferrocarril.



Los caminos y otros medios de comunicación resultaron seriamente afectados con el levantamiento, había conflictos entre los obreros y los empresarios, aunque los proyectos continuaban, como la unión de Cuernavaca y la ciudad mediante transporte eléctrico. Finalmente, en agosto de 1913, se terminó la construcción de una vía eléctrica hacia Santa Fe y el Desierto de los Leones.

Durante la Presidencia de Miguel de La Madrid Hurtado, en 1983, se emitió un decreto con el que se constituyó la Comisión Mixta Consultiva del Transporte en el Distrito Federal, con el fin de coordinar la adopción de medidas administrativas y operativas tendientes a solucionar los problemas de calidad, tránsito y transporte en el DF y zona conurbada del Estado de México.

Con la llegada del Ingeniero Cuauhtémoc Cárdenas Solórzano al Gobierno de la Ciudad, el primero elegido democráticamente, en 1997 se introdujo un servicio especializado para personas con discapacidad y personas de la tercera edad, en dos líneas con 20 autobuses y una línea con cuatro trolebuses.

En 1999, tras sufrir una reestructuración administrativa, la Secretaría de Transportes y Vialidad creó como un órgano desconcentrado el Instituto del Taxi, con la idea de inducir el desarrollo y mejoramiento del servicio individual de pasajeros.

Un año más tarde se creó la Red de Transporte de Pasajeros (RTP) para brindar servicio radial de transporte público de pasajeros, preferentemente en zonas periféricas de escasos recursos y con rutas que conectan a zonas de alta población de la ciudad con el Sistema de Transporte Colectivo Metro.

El crecimiento de vialidades a base de pavimentos, surge por la necesidad de satisfacer y desahogar el tránsito pesado; con la llegada de nuevos sistemas de transporte, el incremento en el número de automóviles y vehículos de carga pesados, fue indispensable contar con tramos carreteros más amplios, mejor diseñados para resistir las solicitudes del tránsito.



1.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES Y TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN.

Los aztecas eran diestros constructores y artesanos que usaron cinceles, piedras duras, y navajas de obsidiana a modo de herramientas. Muchos de los materiales usados eran los mismos que se usaron durante alrededor de dos mil años en el valle central de México.

Sin embargo, en las construcciones más recientes de Tenochtitlan, los aztecas comenzaron a concentrarse en la solidez de sus edificios, debido al subsuelo que paulatinamente se iba hundiendo. Como resultado, se usó ampliamente el tezontle, una piedra volcánica fuerte y liviana. El tezontle era muy popular porque resultaba fácil de tallar y su textura y color eran atractivos. Se usó en la construcción de edificios monumentales, como relleno de muros, y para hacer techos. Otra técnica popular que se empleó para evitar el hundimiento de la ciudad fue el uso de plataformas como cimientos, o encajar pilotes de madera en la tierra, en apretada formación. Esto quedó a la vista durante las excavaciones.

El metal (con la excepción del cobre) era desconocido para los aztecas. Se usaron cuerdas, cuñas, u otros medios para cortar la piedra, en tanto que la arena y el agua se utilizaban comúnmente como abrasivos. La mayoría de los materiales de construcción usados por los aztecas eran de la región o los adquirían por medio del comercio. En Tenochtitlan, los manjares de las ciénagas tales como las ranas, los peces, y las algas, se trocaban por materiales de construcción como las rocas y el relleno. Las rocas y los rellenos se usaban para ampliar y estabilizar las pantanosas chinampas. El escombro, el mortero, el adobe, y la cal para hacer estuco también se usaban en forma habitual. La piedra suelta y el escombro se importaban de las regiones costeras. Fuera de Tenochtitlan, las gentes usaban madera de los bosques deshabitados.



Actualmente en México se siguen utilizando materiales para la construcción como la piedra, la cual, debido a sus características geométricas sirven para pavimentar caminos rurales o provisionales, incluso decorativos en las ciudades.

Siguiendo con el estudio de los procesos constructivos, en la época del Virreinato, se construyeron importantes caminos por donde los reyes y emperadores viajaban, uno de ellos fue el Camino Real en el Valle de Ojocaliente, en Zacatecas. Del cual, se describe su proceso constructivo y los criterios de diseño.

1.2.2 CONSTRUCCIÓN DEL CAMINO REAL EN EL VALLE DE OJOCALIENTE, ZACATECAS.

Fournier¹ relata cómo el tránsito de personas se hacía mayormente en lomos de mulas, carros, carretas y caballos, teniendo como punto nodal la ciudad de México, de donde partía el “camino de la plata” a varias ciudades de la entonces Nueva España, mencionando un problema frecuente en la localización de los caminos por los que se transitaban bienes antiguamente, que es el de asentamientos coloniales y modernos sobre las huellas que pudieron dejar esas rutas. Ante tal observación, cabe destacar la conveniente ubicación del tramo estudiado del camino, el cual no sólo se encuentra despejado de estructuras contemporáneas, sino que se asienta en un entorno natural, rodeado de flora y fauna típica de la región.

Powell² realiza una semblanza histórica de los acontecimientos que dieron origen a la creación de los “caminos de la plata”, cuyas labores de construcción estaban ya iniciadas en 1550, argumentando que fue esencialmente el desarrollo minero en Zacatecas y sus alrededores lo que impulsó el avance de las vialidades, cuyo fin era comunicar a los asentamientos entre sí. En 1551 se observa la importancia de la ruta México-Zacatecas por el constante tránsito; sin embargo,

¹ Patricia Fournier, “Arqueología de los caminos prehispánicos y coloniales”, en *Arqueología mexicana, rutas y caminos en el México prehispánico*, vol. XIV, núm. 81, México, 2006, pp. 26-30.

² Philip Wayne Powell, *La guerra chichimeca (1550-1600)*, México, FCE, 1977, p. 32.



existieron rutas que datan de 1546 entre Zacatecas y Guadalajara, en la que se destaca que estaban lo suficientemente niveladas para permitir el tránsito de carretas, realizándoseles posteriores mejoras para permitir el paso de grandes carros.

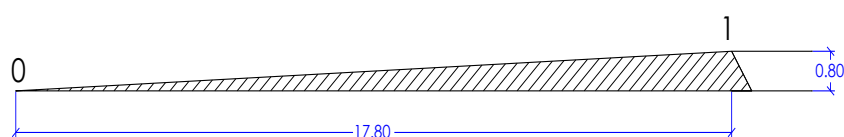
La figura 1.1 muestra una imagen del empedrado del camino en el tramo de estudio, en el cual se aprecia claramente la presencia de una gran columna de piedra interceptada por filas a distancias regulares formando una traza de parrilla; tales elementos son conocidos como niveles, mientras que el área de los cuadros que delinean se conoce como bombeo. Los niveles, como su nombre lo indica, son las líneas encargadas de producir planos ligeramente inclinados a los lados del camino, los cuales son rellenados por el bombeo, formando así tendidos que deslizan el agua de lluvia a los costados de la vialidad, impidiendo de esa manera que se inunde por la acumulación de agua.



Figura 1.1. EMPEDRADO DEL CAMINO REAL. PUEDEN APRECIARSE LOS NIVELES Y EL BOMBEO.

La pendiente del tramo del camino esquematizado (figura 1.2, recuadro superior) es de 4.45%, el material de construcción predominante es la riolita, observándose en mucho menor medida la presencia de escoria roja, tezontle, basalto y limonita. La mezcla de unión de las piedras es de cal, arena y grava, abundando también el ripio de 2 a 4 cm de diámetro.

Habiendo realizado un muestreo sistemático para cada tipo de piedra de acuerdo con su función constructiva, el tamaño promedio de las medidas de superficie de los “adoquines” del empedrado es de 12 × 18 cm para los que sirven de bombeo, y de 36 × 23 cm para los usados en los niveles, mientras que los componentes pétreos empleados en el basamento o posible cimentación, como es de esperarse, tienden a ser los más grandes (figura 1.2, recuadro inferior), presentando un volumen promedio de 44 × 32 × 23 cm.



Tipología de materiales de construcción y sus elementos	
RIOLITA.....	INICIO
TEZONTLE.....	PENDIENTE MAXIMA.....
BASALTO Y LIMONITA.....	

Figura 1.2. PERFIL DE LA PENDIENTE SURESTE-NOROESTE DE UN TRAMO DEL CAMINO Y PERFIL ESTRATIGRÁFICO.

La construcción en piedra es de forma tosca e irregular; usada conforme es extraída de la cantera, y es una técnica que se ejecutaba por el albañil; idealmente, la piedra adecuada es la de mayor densidad de masa, es decir, la más dura y pesada, buscando los elementos pétreos de forma cercana al cubo, provistos de ángulos, los que permitan sentarlos y trabarlos entre sí para formar el tejido constructivo³.

³ Juan de Villanueva, *Arte de albañilería*, Madrid, Editorial Nacional, 1984, p. 57.



Las piedras que se pueden observar en el perfil estratigráfico de la figura 1.2 guardan las características descritas; sin embargo, existen mejores materiales de construcción en cuanto a buscar la roca más pesada y dura; tal es el caso del basalto, que tiene una mayor densidad de masa respecto a la riolita, siendo esta última la piedra que prácticamente constituye al camino. La razón de tal selección puede atribuirse a que se usó el material más fácil de angular y el más abundante en la región, considerando también que la toba de riolita en particular llega a presentar incrustaciones de otros minerales, por lo que puede ser más quebradiza.

Las partes de un elemento de mampostería —es decir, una piedra irregular para la construcción— se denominan: paramento para la parte frontal, que es la que se encuentra expuesta en el muro; lecho, que es la sección donde se asentará otra piedra; sobrelecho, que es la parte que se sentará sobre otra piedra; trasdós⁴, que es una cara opuesta al paramento, la cual puede ir unida a otra piedra para formar el grueso de un muro; y las juntas, consideradas superficies que forman la unión entre piedras por sus lados. En la figura 1.2 del perfil estratigráfico es posible observar en el tejido constructivo el lecho, sobrelecho, juntas y el trasdós.

Para la ubicación de la piedra en el tejido constructivo se escogen las áreas de ésta de acuerdo con las funciones referidas; de esa manera la sección más plana y con la dimensión más larga puede ser el paramento, en el caso del lecho, para compensar irregularidades; se traba el sobrelecho con cantos y cuerpos de piedra menores, y en el caso de que exista una diferencia de áreas entre las dos secciones referidas, se sule con elementos alargados denominados “llaves”.

La técnica de construcción en mampostería comienza con la abertura de zanjas hasta un suelo firme, colocando dentro de éstas las piedras de mayor volumen, aplicando encima una capa de mezcla cal-arena para sentar encima otra hilada de piedras de acuerdo con las técnicas ya mencionadas, complementando

⁴ El trasdós es un término arquitectónico que designa el plano superior externo convexo de un arco o bóveda. A veces se denomina extradós



que las irregularidades del asiento lecho-sobrelecho ahora pueden ser compensadas por la misma mezcla y ripios para formar planos casi rasos, siguiéndose el procedimiento de asentar hiladas hasta alcanzar una altura determinada en muros de gran grosor, como lo es el caso de estudio, se compactan los materiales con un pisón a fin de incrementar la densidad de la construcción.

En el caso de estudio es posible observar en el perfil estratigráfico (figura 1.2) la aplicación de las técnicas descritas, observando piedras de gran volumen al fondo, cuyo trasdós es plano y en algunos casos conserva la dimensión más larga. También es posible observar una gran cantidad de ripios sueltos, por lo que se puede deducir un deterioro común, que es la disgregación de la mezcla de unión.

Es importante hacer mención en este capítulo de uno de los materiales de origen natural que revolucionó la forma de construir carreteras, cuyo uso y aplicación sirvió para la creación de métodos de diseño y construcción de pavimentos en todo el mundo; el asfalto. Y que en México también ha existido, pero que al inicio de las civilizaciones no se utilizó.

1.3 ORIGEN E INCORPORACIÓN DEL ASFALTO COMO ELEMENTO CONSTRUCTIVO EN LOS PAVIMENTOS.

Prehistoria. Se han encontrado esqueletos de animales prehistóricos conservados intactos hasta nuestros días en depósitos superficiales de asfalto en el pozo La Brea, en los Ángeles de California.

3200 a 540 a.C. Excavaciones arqueológicas recientes indican el amplio uso del asfalto en Mesopotamia y en el Valle del Indio como aglomerante para albañilería y construcción de carreteras y para capas de impermeabilización y depósitos de agua.



300 a.C. El asfalto se emplea extensamente en Egipto en los embalsamamientos.

1802 d.C. En Francia se emplea roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras.

1838 d.C. En Filadelfia se emplea roca asfáltica importada en la construcción de las aceras.

1870 d.C. (Aproximadamente) Construcción del primer pavimento asfáltico en Newmark, Nueva Jersey, por el profesor E. J. DeSmedt, químico belga.

1876 d.C. Construcción del primer pavimento de tipo sheet asphalt en Washington D.C., con asfalto de lago importado.

1902 d.C. En los Estados Unidos se obtienen de la destilación del petróleo aproximadamente 20 000 ton de asfalto por año.

El asfalto es un material de los llamados termoplásticos, el cual es muy complejo desde el punto de vista químico ya que es obtenido como el residuo en el proceso de refinación del petróleo crudo. Esto hace que el control de calidad de este material sea pobre. Sin embargo, este es un material de suma importancia para la industria de la construcción por sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, y sobre todo por el bajo costo ya que, como mencionamos, es el residuo en el proceso de refinación del petróleo.

También tiene una gran variedad de aplicaciones; las que podemos mencionar: carpetas asfálticas, adhesivos, sellantes, impermeabilizantes, mastiques, etc. Los volúmenes de uso del asfalto son muy grandes, sobre todo en lo referente a la fabricación de carpetas asfálticas en donde es, sin duda, el material más importante. El amplio uso del asfalto en la construcción de carreteras es debido, en gran medida, a su bajo costo y a sus propiedades de hidrofobicidad y una relativa resistencia al intemperismo.



1.4 EL SURGIMIENTO DE LAS CARRETERAS EN MÉXICO.

En 1925, el Presidente Plutarco Elías Calles creó la Comisión Nacional de Caminos: además la decisión de darse a la tarea de que construir y mantener los nuevos caminos fuera obra de mexicanos.

El punto de partida en la historia de la construcción de carreteras en México fue en 1925, año en que el creciente número de automóviles, la incipiente industria automotriz y el establecimiento de nuevas instituciones, fueron factores que impulsaron la creación de carreteras que enlazaran las principales ciudades del centro y norte del país, y los litorales del Golfo y el Pacífico.

En diciembre de 1932, por acuerdo del entonces Presidente Pascual Ortiz Rubio, se fundó el Sistema de Cooperación Federal con los Estados. Con él, cada entidad, apoyada por la Junta Local de Caminos respectiva, y con un sistema financiero basado en la aportación federal y estatal bipartita, se realizaron y conservaron nuevos caminos. Ese mismo acuerdo transformó la Comisión Nacional de Caminos en la Dirección Nacional de Caminos, independiente de la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas.

De 1960 a 1970 la red nacional de carreteras creció 26 mil 500 kilómetros más, para sumar así 71 mil Km. de ésta época sobresalen la construcción de carreteras directas de cuotas. Para 1970 se contaba con un poco más de mil kilómetros de autopistas, de los cuales 550 correspondían a vías de cuatro o más carriles de circulación separadas por cada sentido de tránsito.

También característico del mismo periodo fue el énfasis otorgado a la construcción de los caminos alimentadores de la red troncal, concretamente los correspondientes al Programa de Caminos Rurales de Acceso que, en 1971, toma forma institucional en el Programa de Caminos de Mano de Obra.



Hasta 1983, la responsabilidad de construir y operar la infraestructura del transporte vuelve a consolidarse en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. También en ese año se creó la Subsecretaría de Infraestructura, que sustituyó a la de Obras Públicas, con la responsabilidad de planear y construir la infraestructura carretera, portuaria, aeroportuaria y ferroviaria del país.

Para 1989, el sistema carretero nacional alcanzaba una longitud de 238 mil kilómetros, de los cuales 45 mil correspondían a la red federal, mil a carreteras de cuota, 59 mil a caminos estatales alimentadores, 98 mil a caminos rurales y 35 mil a brechas mejoradas.

La crisis económica sufrida en el país entre 1982 y 1988 afectó severamente a la infraestructura carretera e impidió su crecimiento, modernización y conservación.

Debido a esto, se vio que las necesidades de inversión para la construcción de infraestructura carretera, a mediano plazo, contrastaban con el monto de recursos que el gobierno Federal podía asignar en esa época. Basta señalar que el gasto en conservación en los años setentas representó el 0.75 por ciento del producto interno bruto, mientras que durante los ochenta esta relación disminuyó al 0.35 por ciento.

Por tanto, resultaba indispensable que el gobierno encontrara nuevas fuentes de financiamiento que permitieran modernizar la red vial mediante la construcción de nuevas autopistas de cuatro carriles, así como reconstruir la existente, para adecuarla a las cargas y volúmenes que circulaban por ella.

1.4.1 LA IMPORTANCIA DE LA INFRAESTRUCTURA.

En la actualidad, los países en el mundo están dando alta prioridad a la modernización de su infraestructura, que les permita lograr una mayor participación en la economía global.



Con ese propósito, para México es necesario elevar la cobertura, calidad y competitividad de su infraestructura.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) es la encargada de desarrollar la infraestructura de comunicaciones y transportes; así como los servicios públicos asociados con el propósito de que sean accesibles a todos los mexicanos y que contribuyan a mejorar su calidad de vida.

1.4.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE MÉXICO.

Orografía. La presencia de grandes cadenas montañosas dificulta y encarece la comunicación transversal, por lo que los costos de construcción para carreteras entre el altiplano y las costas se elevan a niveles prohibitivos.

Comunicación terrestre. La comunicación del país en sentido norte-sur dispone de mejores vías de comunicación y mayores facilidades de transporte que la que ocurre en sentido este-oeste.

Tránsito en grandes ciudades. La falta de vialidades urbanas y el crecimiento acelerado de población en grandes ciudades, provoca problemas de congestión y capacidad en horas de mayor demanda en vías federales de acceso.

Para México, la Red Carretera Nacional constituye la columna vertebral del sistema de transporte, ya que por vía terrestre, particularmente por las carreteras, se desplaza el 53% de la carga nacional y el 98% de los pasajeros que se trasladan a lo largo y ancho del país. Por autotransporte se movilizan cerca de 479 millones de toneladas y 3,170 millones de pasajeros cada año.

1.4.1.2 LA INVERSIÓN EN CARRETERAS.

La red carretera mexicana presenta necesidades de inversión en construcción, conservación, modernización y ampliación de carreteras, que permitan atender carreteras federales, carreteras alimentadoras, caminos rurales y autopistas de cuota.



Los montos de inversión en México, son relativamente bajos en infraestructura, ya que son alrededor del 2% del Producto Interno Bruto (PIB); en comparación con Chile que invierte más del doble, mientras que China destina un 9% del PIB.

En el mundo las principales, y casi únicas, fuentes de recursos para financiar inversiones en carreteras son las siguientes:

- El presupuesto general del Estado, aplicado en sus diferentes niveles territoriales
- Los peajes que se cobran en las autopistas de cuota
- Un sobreprecio a los combustibles que aplica como cargo a los usuarios de las carreteras.

Los recursos de inversión necesarios para construir carreteras nuevas, ampliar la capacidad de las existentes, conservar en buenas condiciones físicas los tramos en servicio y extender su cobertura a todo el país, superan, con mucho, a los que se pueden obtener de recursos fiscales en presupuestos federales anuales.



1.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.

De acuerdo a los antecedentes históricos expuestos durante este capítulo, se pueden identificar las causas principales que dieron origen a la construcción de caminos y carreteras durante la civilización azteca, la época de la conquista y el México actual; la necesidad comercio, la extensión territorial, la conquista, las guerras de independencia y revolución, la comunicación entre los estados de la república y el crecimiento económico.

Y a pesar de que los Aztecas solo acondicionaron las brechas con el paso de la gente, y de esta forma crearon la mayoría de los caminos, fue la llegada de los Españoles quienes utilizaron como referencia los caminos existentes para comenzar a construir caminos más amplios y de mayor resistencia, esto por los sistemas de transporte utilizados en aquellos tiempos. Posterior a todo esto, la ingeniería de los caminos estaba a cargo de ingenieros enviados desde España para construir caminos de mayor jerarquía y que fueron utilizados para el traslado de gente importante, a estos caminos se les denominó “caminos de plata”.

La evolución más importante de los pavimentos se dio con el uso del asfalto. El cual comenzó a ser utilizado en nuestro país a partir del siglo XIX, esta nueva tecnología fue incluida en el diseño de los pavimentos y no solamente mejoró la apariencia de las carreteras, su resistencia y su utilidad sino que revolucionó los procesos constructivos.

Toda esta información sirve para conocer a fondo, las causas que originaron la creación de organismos y dependencias públicas y privadas, encargadas de la construcción de pavimentos y carreteras en México.

Una vez que ya contamos la información necesaria sobre la historia de las carreteras en México, en el siguiente capítulo se mencionarán las condiciones actuales y métodos de diseño utilizados en la construcción de los pavimentos.



CAPÍTULO 2.- LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES DE MÉXICO EN LA ACTUALIDAD.



2. CAPÍTULO II.- LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES DE MÉXICO EN LA ACTUALIDAD

2.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

El siguiente capítulo es el más extenso del presente trabajo de investigación, por esa razón se divide en cuatro partes importantes. En la primer parte se presenta un breve resumen sobre los pavimentos flexibles, su definición y proceso constructivo tradicional. En la segunda parte se integra el concepto del asfalto como elemento primordial en el diseño y construcción de un pavimento flexible; así como su clasificación y las pruebas de laboratorio que se le realizan. En la tercer parte se hace mención de los deterioros de los pavimentos flexibles y las causas que lo originan y finalmente, en la cuarta parte se describe la situación actual de la infraestructura carretera de México y cómo influye el sector carretero en la economía del país respecto al mundo.

Estas cuatro partes se consideran importantes por ser parte del proceso evolutivo de los pavimentos flexibles, es decir, es parte del desarrollo y crecimiento de las carreteras del país y por esa razón se debe hacer mención de estos aspectos para comprobar lo siguiente; la importancia de conocer el concepto de pavimento flexible y su proceso constructivo, es para identificar qué materiales son utilizados y las pruebas a las que son sometidos los materiales utilizados como el asfalto y los agregados pétreos para cada capa que lo comprende con la finalidad de obtener un elemento estructural de buena calidad, por consiguiente, con toda esa información se tendrán las herramientas necesarias para diseñar y construir pavimentos de buena calidad y buen desempeño.

La necesidad de conocer el contexto económico del país es para entender el desarrollo de México en las últimas décadas, la forma en que impacta el sector carretero a la economía, siendo éste utilizado como uno de los indicadores económicos y es comparado a nivel mundial.



2.2 LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

El pavimento es la capa o conjunto de capas que se encuentran comprendidas entre la subrasante y la rasante. Se dividen en dos tipos: los pavimentos rígidos o de concreto hidráulico y los pavimentos flexibles o de concreto asfáltico.

En un pavimento rígido la losa de concreto suele constituir, al mismo tiempo, la capa de rodamiento y el medio para soportar y distribuir la carga. Cuando el suelo que forma las terracerías es de mala calidad, es necesario colocar bajo la losa un material de subbase de grava bien graduada y compactada o de suelo estabilizado para conseguir una mejor distribución de las cargas. Figura 2.1.



Figura 2.1- ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO RÍGIDO.

En el caso de los pavimentos flexibles, sus partes constitutivas son:

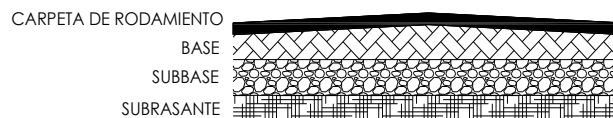


Figura 2.2- ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE.

En un pavimento de flexible (Figura 2.2), la subbase es la capa de material que se construye directamente sobre la terracería y que está formada por un material de mejor calidad que el de aquella, obtenido en la generalidad de los casos de depósitos cercanos a la obra. La subbase tiene como función:



a) Reducir el costo del pavimento disminuyendo el espesor de la base que se construye, generalmente, con materiales de mayor costo por tener que cumplir con especificaciones más rígidas.

b) Proteger a la base aislándola de la terracería ya que cuando ésta está formada por material fino y plástico (generalmente es el caso) y cuando la base es de textura abierta, de no existir el aislamiento dado por el material de subbase, el material de la terracería se introduciría en la base pudiendo provocar cambios volumétricos perjudiciales a varias las condiciones de humedad, a la vez que se disminuiría la resistencia estructural de la base. El aislamiento producido por la subbase no solo consiste en evitar que los finos plásticos de la terracería se introduzcan en la base de textura abierta, sino también en evitar los bufamientos y revoltura de ambos materiales cuando se usan piedras trituradas o gravas de río para formar la base.

c) En caminos en construcción frecuentemente se construye la subbase, que propiamente es un revestimiento provisional, para tener una superficie de rodamiento que facilite, en cualquier época del año, el paso del equipo de construcción y de los vehículos que transiten por el camino antes de quedar pavimentado. Si el revestimiento provisional una vez que ha estado en servicio reúne las condiciones de calidad para subbase, este espesor debe tomarse en cuenta al proyectar el espesor total del pavimento, de lo contrario debe dejarse como parte de las terracerías.

La base es la capa de material que se construye sobre la subbase o, a falta de ésta, sobre la terracería, debiendo estar formada por materiales de mejor calidad que el de la subbase. Los principales requisitos que debe satisfacer la capa de base son:



-
- a) Tener en todo tiempo la resistencia estructural para soportar las presiones que le sean transmitidas por los vehículos estacionados o en movimiento.
 - b) Tener el espesor necesario para que dichas presiones al ser transmitidas a la subbase o a la subrasante, no excedan la resistencia estructural de éstas.
 - c) No presentar cambios volumétricos perjudiciales al variar las condiciones de humedad.

La carpeta asfáltica es la capa de material pétreo cementado con asfalto que se coloca sobre la base para satisfacer las funciones siguientes:

- a) Proporcionar una superficie de rodamiento adecuada que permita, en todo tiempo, un tránsito fácil y cómodo de los vehículos.
- b) Impedir la infiltración del agua de lluvia hacia las capas inferiores, para impedir que el agua disminuya su capacidad para soportar cargas.
- c) Resistir la acción destructora de los vehículos y de los agentes climatéricos.

En no pocas ocasiones, por una u otra circunstancia, generalmente controlables, se presentan pequeños asentamientos ya sea de la base o de la subbase, los cuales no son en extremo perjudiciales, de ahí que convenga que el pavimento tenga cierta flexibilidad que la haga capaz de adaptarse a esas pequeñas fallas sin necesidad de reparaciones costosas.

2.3 PROCESO CONSTRUCTIVO DE TERRACERÍAS Y PAVIMENTOS

El proceso para llevar a cabo la construcción de un pavimento se describe secuencialmente a continuación.



2.3.1 TERRACERÍAS.

El material para terracerías proviene de los cortes que se hayan efectuado o de un banco próximo que reúna las características pedidas.



FIGURA 2.3.1- MOVIMIENTO DE TIERRAS

Se vigilará que la arcilla o el limo no contengan terrones, pues de existir será necesario “bandearlos” con el tractor, esto es para pasar sobre de ellos sus orugas hasta que se hayan desecho totalmente. El contenido de agua que se añade será determinado por el laboratorio o por el residente de acuerdo con su experiencia, normalmente oscilará entre 8 y 25% del peso del material. Si el agua añadida se excedió, habrá que expulsarla mediante sucesivos movimientos del material, se acamellonará y tenderá sucesivamente, lo que provocará que se ore y pierda por evaporación la humedad sobrante. Cada capa se tiende con la motoconformadora y compacta con el rodillo vibratorio pata de cabra hasta que alcance el grado Proctor pedido, normalmente de 90%. Se sobreponen capas sucesivas de material hasta concluirlo.



2.3.2 GEOSINTÉTICOS

Geosintéticos es la denominación con la que se conoce a las fibras a base de poliéster, polipropileno y PVC, fibras fabricadas a partir de polímeros como derivados químicos del petróleo y que se usan como auxiliares para:

- Confinar las estructuras de suelo mediante muros a base de geomalla.
- Soportar terraplenes sobre suelos blandos.
- Proteger taludes contra la erosión causada por el agua y el viento.
- Proteger cimentaciones, en el caso de las pilas evitando que estén en contacto con suelos contaminados o se introduzca en ellas agua freática cuando su nivel sea elevado.



Figura 2.3.2- COLOCACIÓN DE GEOSINTÉTICO

En el primer caso se acostumbra desenrollar los rollos de geosintético y dejarlos sobre el suelo y se tiende el material sobre la capa a reforzar; se recomienda que en esta primera capa no se use el rodillo pata de cabra para evitar perforar la malla.



Cuando hay suelos muy blandos de tipo pantanoso se puede colocar un geotextil, e incluso reforzarse con una geomalla, sobre él se colocará el terraplén, su misión será impedir que el material se deslice y pierda su capacidad de carga. De considerarlo conveniente se selecciona un geotextil que permita el flujo de agua pero impida la salida del material fino, sobre él se coloca una capa de material grueso para romper la capilaridad y sobre ella la grava cementada. El conjunto tendrá una alta capacidad de carga permitiendo el tránsito de vehículos pesados.

2.3.3 MEZCLADO DE MATERIALES PARA HACER UNA GRAVA CEMENTADA.

Se emplea como material grava cementada a base de arcilla o limo mezclado con grava y arena. Los camiones depositarán el material pétreo y el tepetate sobre la rasante de la última capa que se haya compactado. Se formarán uno o dos camellones con las pilas dejadas, contándolas y multiplicándolas por el volumen de las cajas de los camiones y se tendrá el volumen total, determinado éste se procede al mezclado. Después con el auxilio de una motoconformadora, se procede a mezclar la grava con la arcilla o el limo y formar una grava cementada a la que se incorporará agua y por medio de riegos y mediante sucesivas pasadas de acamellonamiento se tendrá un material homogéneo.



FIGURA 2.3.3.- TENDIDO DE GRAVA CEMENTADA SOBRE LA SUBRASANTE



2.3.4 CONSTRUCCIÓN DE LA SUBBASE.

Su granulometría será uniforme y contendrá desde finos hasta gravas de menos de 2". La proporción de cada material será la que señale el laboratorio, como referencia puede decirse que se aproximará a 60% de material plástico y 40% de pétreo. La grava cementada se tenderá en espesores que al compactarse deberán quedar en 15 cm, salvo indicaciones en contrario del proyecto o del laboratorio. Las capas se tenderán con la motoconformadora y compactarán con rodillo dúo-pactor.

Para compactar la subbase y la base es recomendable que en los tramos rectos se inicie por las orillas y se concluya en el centro y en las curvas se inicie en la parte interior de la curva y se concluya en la exterior.



FIGURA 2.3.4- TENDIDO Y COMPACTACIÓN DE LA SUBBASE

2.3.5 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE.

Se emplea como material grava cementada controlada con material grueso menor de 1.5". Su proceso constructivo es similar al de la subbase, pero se incrementará la proporción del material pétreo sobre el plástico a una relación aproximada de 60% de grava y arena y 40% de arcilla y limo con lo que se incrementará su resistencia.



La compactación mínima que se le dará será del 98% Proctor. Las capas se tenderán con la motoconformadora y compactarán con rodillo vibrocompactador.



FIGURA 2.3.5- TENDIDO DE LA BASE

2.3.6 MEDICIÓN DE LA COMPACTACIÓN.

Cada capa se compactará hasta alcanzar el grado pedido por el proyecto que será como mínimo de 95% para la subbase y 98% Proctor estándar para la base. Es recomendable que durante el proceso de compactación se tomen muestras para determinar peso y humedad por unidad de volumen (peso volumétrico seco máximo) e indicar la cantidad de agua que se va a añadir o eliminar.



FIGURA 2.3.6- COMPACTACIÓN



2.3.7 CONSTRUCCIÓN DE LA CARPETA.

Terminada la base se procede a colocar la carpeta. Puede hacerse en tres formas: con mezcla en caliente elaborada en planta usando cemento asfáltico y pétreos y acarreada al sitio donde se tenderá y compactará; con riegos de asfaltos rebajados colocados sobre capas de pétreos acomodados de grueso a fino; o con emulsiones de asfalto en frío y pétreos que se mezclan en el sitio hasta formar una masa uniforme que se tiende y compacta.



FIGURA 2.3.7- TENDIDO DE LA CARPETA ASFÁLTICA



FIGURA 2.3.8- PAVIMENTO FLEXIBLE



Una vez que se ha definido el concepto de pavimento flexible y su proceso constructivo, es importante hacer mención de uno de los principales componentes del cual se conforma el pavimento en cuestión; el asfalto. Del cual se describen a continuación su definición y algunas de sus características químicas, así como su comportamiento y las pruebas realizadas en laboratorio, destinadas a los diferentes métodos de diseño.

2.4 EL ASFALTO

El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución. El petróleo crudo se destila para separar sus diversas fracciones y recuperar el asfalto. Procesos similares producidos naturalmente han dado lugar a yacimientos naturales de asfalto, en alguno de los cuales el material se encuentra prácticamente libre de materias extrañas, mientras que en otros está mezclado con cantidades variables de minerales, aguas y otras sustancias.

2.4.1 PROPIEDADES.

El asfalto es un material de particular interés para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida, puede licuarse fácilmente por la aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsión.

2.4.2 ASFALTOS OBTENIDOS DEL PETRÓLEO.

Casi todo el asfalto producido se obtiene de la destilación del petróleo. Este asfalto se produce en una variedad de tipos y grados que va desde sólidos duros y quebradizos a líquidos casi tan fluidos como el agua. La forma semisólida, conocida como betún asfáltico, es el material básico. En la figura 2.4 se indican los tipos de productos producidos en la destilación.



Los productos asfálticos líquidos se preparan generalmente diluyendo o mezclando los betunes asfálticos con destilados de petróleo o emulsificándolos con agua. En la figura 2.5 se indican diversos tipos de productos asfálticos líquidos.

GASOLINA O NAFTA	QUEROSENO	ACEITES NO VOLATILES O DE EVAPORA- CION LENTA	AGUA Y EMULSIFI- CANTE	AGUA Y EMULSIFI- CANTE
BETUN ASFALTICO	BETUN ASFALTICO	BETUN ASFALTICO	BETUN ASFALTICO	ASFALTOS LIQUIDOS RC, MC O SC
CURADO RAPIDO (RC)	CURADO MEDIO (MC)	CURADO LENTO (SC)	EMULSIONES ASFALTICAS	EMULSIONES ASFALTICAS INVERSAS

FIGURA 2.5 – PRODUCTOS ASFÁLTICOS LÍQUIDOS

NOTA: LAS DIMENSIONES DE ESTOS DIAGRAMAS NO SON PROPORCIONALES A LA COMPOSICIÓN

En el Anexo 1 se puede consultar el cuadro sinóptico con las aplicaciones que tiene el asfalto, entre las cuales destacan las mezclas asfálticas para pavimentación que se mencionan a continuación.

2.4.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTACIÓN

A continuación se describen brevemente los ensayos normalmente empleados para las mezclas asfálticas para pavimentación y se hace referencia a los procedimientos normalizados de realización de estos ensayos.

MÉTODO MARSHALL. Éste método puede emplearse para proyecto en laboratorio y comprobación en obra de las mezclas que contienen betún asfáltico y áridos cuyo tamaño no exceda de 1". Las principales características del ensayo son el análisis densidad-huecos y los ensayos de estabilidad y fluencia sobre probetas de mezcla compacta.

METODO DE HVEEM. El método de Hveem para proyecto y comprobación de mezclas asfálticas comprende los tres ensayos principales siguientes:



1. Ensayo del estabilómetro.
2. Ensayo del cohesiómetro
3. Ensayo del equivalente centrífugo en queroseno (CKE).

Estos ensayos se emplean para proyectar mezclas en el laboratorio. El CKE se emplea también como ensayo de obra.

METODO HUBBARD'FIELD. Es un procedimiento empleado para el proyecto en laboratorio de mezclas asfálticas para pavimentación. El procedimiento se desarrolló originalmente para el proyecto de mezclas para pavimentación de tipo arena-asfalto o *sheet asphalt*, empleando betunes asfálticos, en las que todos los áridos pasaran por el tamiz número 4 y al menos el 65% por el número 10. Las partes principales del ensayo son un análisis densidad-huecos y un ensayo de estabilidad.

METODO TRIAXIAL. Se emplea fundamentalmente para investigación sobre mezclas asfálticas, y rara vez para proyecto o ensayos de rutina.

Se considera generalmente que la probeta empleada en el ensayo triaxial debe tener una altura al menos doble que su diámetro. Normalmente se emplean probetas compactadas de unas 8" (20 cm) de altura por 4" (10 cm) de diámetro. Usualmente se determinan las características de densidad y huecos de la probeta compactada.

DENSIDAD. La densidad o peso unitario de una mezcla asfáltica para pavimentación se determina con las siguientes finalidades:

- A) En probetas compactadas en laboratorio para:
 1. Obtener un punto de partida para calcular el porcentaje de huecos y huecos rellenos de asfalto en las mezclas compactadas, parte integrante de algunos procedimientos de proyecto de mezclas asfálticas para pavimentación.



2. Dar una indicación del contenido de asfalto óptimo en algunos procedimientos de proyecto de mezclas

3. Fija una base para controlar la compactación durante la construcción del pavimento asfáltico.

B) En probetas obtenidas de pavimentos construidos, para comprobar la densidad del pavimento y la eficacia de las operaciones de apisonado.

El procedimiento usual para determinar la densidad es pesar la probeta, determinar su volumen y calcular la relación peso-volumen en unidades convenientes. El volumen de la probeta se mide frecuentemente determinando el volumen desplazado. La probeta se pesa primeramente al aire y después sumergida en agua, y la diferencia en peso da el volumen de la probeta. Cuando se mide el peso unitario en kilogramo por metro cúbico, la densidad de la probeta se calcula según la fórmula siguiente:

$$d = \frac{W_a}{W_a - W_w}$$

Donde;

d = densidad en kilogramo por litro.

W_a = peso de la probeta al aire, en gramos.

W_w = peso de la probeta sumergida en agua, en gramos.

En algunos casos el volumen de la probeta se determina por medición directa, pero, en general, con este método es difícil obtener exactitud suficiente.



HUECOS. La determinación de los huecos contenidos en la probeta compactada forma parte del método del proyecto. Los huecos de estas probetas pueden calcularse conociendo la densidad de las probetas compactadas, el peso específico de los áridos y el del asfalto.

Para calcular el contenido de huecos de una probeta compactada debe fijarse primeramente la densidad máxima teórica de la mezcla. Este valor es la densidad teórica que se lograría si la probeta pudiera compactarse hasta formar una masa sin huecos. La densidad máxima teórica se determina por la siguiente fórmula, en la que D es la densidad máxima teórica, W y W₁ los porcentajes de áridos y asfalto, respectivamente, y G y G₁ sus respectivos pesos específicos.

$$D = \frac{100}{\frac{W}{G} + \frac{W_1}{G_1}}$$

Una vez determinada la densidad real, d, de la mezcla compactada, el porcentaje de huecos, V, se determina por la fórmula siguiente:

$$V = \frac{100 (D-d)}{D}$$

EXTRACCIÓN. Procedimiento empleado para separar al asfalto de los áridos en una mezcla asfáltica para pavimentación. La finalidad de la extracción es determinar el contenido de asfalto de la mezcla y obtener áridos sin asfalto que puedan emplearse para el análisis granulométrico y cualquier otro ensayo sobre ellos que se desee realizar.

RECUPERACIÓN DEL ASFALTO. Cuando se desea realizar ensayos sobre el asfalto extraído de las mezclas de pavimentación, debe hacerse la recuperación del asfalto sin cambiar sus propiedades. Normalmente se emplea un método de extracción por reflujo.



Uno de los aspectos importantes en los pavimentos, es la conservación. Las carreteras a lo largo de su vida sufren de deterioros ocasionados por diversos factores que se describen a continuación y que son de importante interés porque con ello, se pueden analizar las causas y en base a las observaciones se pueden determinar las soluciones para su respectiva reparación.

2.5 DETERIOROS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

2.5.1 DESPRENDIMIENTOS

BACHES. Oquedades de varios tamaños en la capa de rodamiento por desprendimiento o desintegración inicial. Desprendimiento inicial de los agregados que al paso de los vehículos van formando oquedades.

Causas probables:

- Falta de resistencia de la carpeta
- Escasez de contenido de asfalto
- Espesor deficiente

IDENTACIÓN. Encajamiento de objetos duros en la superficie de rodamiento, produciendo indentación o desgaste localizado en la superficie.

Causas probables:

- Huellas de tractores o equipo pesado de construcción
- Ponchadura de llantas de vehículos pesados
- Accidentes de tránsito

LEVANTAMIENTO POR CONGELACIÓN. Desplazamiento diferencial hacia arriba que produce desintegración parcial o total de capas del pavimento.



Causas probables:

- Ciclos de congelamiento y descongelamiento
- Expansión localizada de capas inferiores
- Expansión localizada de alguna porción de la sección estructural del pavimento

DESPRENDIMIENTO DE AGREGADOS. Pequeñas depresiones en forma de cráter, por separación de los agregados de la carpeta asfáltica, dejando huecos en la superficie de rodamiento.

Causas probables:

- Falta de afinidad con el asfalto
- Escasez de asfalto
- Expansión del agregado grueso

EROSIÓN AVANZADA DE TALUDES. Agrietamiento transversal en acotamientos, que con el tiempo y acción del medio ambiente, va formando oquedades o canalizaciones transversales, hasta llegar a la destrucción total de los taludes del cuerpo del terraplén.

Causas probables:

- Acción del viento y lluvia
- Falta de arropamiento en taludes
- Escasez de drenaje superficial

EROSIÓN TOTAL. Destrucción, eliminación o desaparición de una o varias capas subyacentes a la carpeta asfáltica, produciendo falta total de apoyo interior.

Causas probables:

- Falta de drenaje superficial
- Falta de subdrenaje



-
- Falta de lavaderos

PULIDO DE SUPERFICIE. Desgaste acelerado en la superficie de la capa de rodamiento produciendo áreas lisas.

Causas probables:

- Tránsito intenso
- Agregado grueso de la carpeta con baja resistencia al desgaste
- Excesiva compactación

DESINTEGRACIÓN. Deterioro grave de la carpeta asfáltica en pequeños fragmentos con pérdida progresiva de materiales que la componen.

Causas probables:

- Fin de la vida útil de la carpeta asfáltica
- Tendido de la carpeta en climas fríos o húmedos
- Contenido pobre de asfalto
- Presencia de arcilla en cualquiera de las capas

DESPRENDIMIENTO DE SELLO. Desintegración parcial o zonificada de la superficie de rodamiento; cuando ésta se forma por uno o varios sellos, el agregado tiende a desprenderse dejando zonas expuestas por arranque de la gravilla o granzón.

Causas probables:

- Separación de la película de liga de los áridos por humedad
- Dosificación inadecuada del ligante
- Calidad dudosa del material ligante
- Mala adherencia en capa subyacente
- Espesores insuficientes
- Ejecución de trabajos en malas condiciones de clima



EROSIÓN LONGITUDINAL DE CARPETA. Desintegración parcial de la carpeta asfáltica principalmente en la frontera de la superficie de rodamiento. La carpeta materialmente se va carcomiendo, reduciendo el ancho efectivo de carretera.

Causas probables:

- Falta de soporte de la carpeta en los hombros o acotamientos
- Erosión natural del agua y viento
- Crecimiento significativo de hierbas en acotamiento

2.5.2 DEFORMACIONES

BURBUJA. Ampolla de tamaño variable localizada en la superficie de rodamiento.

Causas probables:

- Presiones de vapor o aire en zonas de la capa de rodamiento
- Liberación de cal en bases estabilizadas

RODERAS O CANALIZACIONES. Asentamiento o deformación permanente de la carpeta asfáltica en el sentido longitudinal debajo de las huellas o rodadas de los vehículos.

Causas probables:

- Baja estabilidad de la carpeta
- Carpeta mal compactada
- Consolidación de una o varias de las capas subyacentes

ONDULACIONES TRANSVERSALES (CORRUGACIONES). Ondulaciones de la carpeta asfáltica en el sentido perpendicular al eje del camino que contienen en forma regular crestas y valles alternados, regularmente con separación menor a 60 cm entre ellas.



Causas probables:

- Unión deficiente entre capas asfálticas y/o base
- Acción de tránsito intenso
- Fuerzas tangenciales producto de aceleraciones y frenado de vehículos

PROTUBERANCIAS. Desplazamiento de parte del cuerpo de la carpeta asfáltica hacia la superficie, formando un montículo de considerables dimensiones.

Causas probables:

- Acción del tránsito intenso
- Liga deficiente entre capas
- Deformaciones plásticas de los materiales

ASENTAMIENTO TRANSVERSAL. Áreas de pavimento localizadas en elevaciones más bajas que las áreas adyacentes o elevaciones de diseño, en el sentido transversal al eje del camino.

Causas probables:

- Deformación diferencial vertical del suelo de cimentación o de las capas que forman la estructura del pavimento.
- Peso propio de la sección del pavimento
- Cambios volumétricos del cuerpo del terraplén

ASENTAMIENTOS LONGITUDINALES. Áreas de pavimento localizadas en elevaciones más bajas que las áreas adyacentes o elevaciones de diseño, en el sentido longitudinal al eje del camino, en especial en los extremos laterales de la superficie de rodamiento.

Causas probables:

- Deformación diferencial vertical del suelo de cimentación o de las capas que forman la estructura del pavimento.



-
- Peso propio de la sección del pavimento.
 - Desplome de cavidades subterráneas.

CRESTAS LONGITUDINALES MASIVAS. Montículos o crestas en el sentido paralelo al eje del camino, presentándose 2 y hasta 4 crestas a todo lo largo de ciertos tramos.

Causas probables:

- Liga inadecuada entre capas asfálticas.
- Flujo de la mezcla por acción de derrame de combustible (Diesel)
- Tránsito intenso muy canalizado.

DESPLAZAMIENTO TRANSVERSAL DE LA SECCIÓN DEL PAVIMENTO. Protuberancias prolongadas de magnitudes considerables en la dirección del tránsito, al borde de la carretera, causando destrucción total en corto plazo.

Causas probables:

- Fuertes asentamientos longitudinales.
- Falta de capacidad estructural del conjunto de capas del pavimento.
- Insuficiente valor relativo de soporte de las capas.

2.5.3 ROTURAS

GRIETAS DE REFLEXIÓN. Grietas longitudinales y transversales que reflejan exactamente el patrón de agrietamiento o de juntas de un pavimento existente, cuando es reencarpetado con concreto asfáltico.

Causas probables:

- Movimiento del pavimento subyacente
- Liga inadecuada entre capas
- Posibles contracciones de capa subyacente



GRIETAS DE REFLEXIÓN TIPO 2. Agrietamiento de la carpeta asfáltica siguiendo o no, un patrón determinado.

Causas probables:

- Falta de unión en grietas de capas inferiores
- Agrietamiento de capas inferiores
- Contracción o dilatación de bases estabilizadas con cemento.

AGRIETAMIENTO PARABÓLICO. Grietas con forma de parábola o de media luna que se forman en la carpeta asfáltica en la dirección del tránsito.

Causas probables:

- Zonas de frenaje de las ruedas
- Mezcla inestable
- Efecto en el arranque de las ruedas

GRIETA ERRÁTICA O EN ZIG-ZAG. Agrietamiento en desorden de la carpeta asfáltica, siguiendo patrones longitudinales en forma errática o de zig-zag.

Causas probables:

- Acción del hielo
- Base defectuosa
- Terraplenes con taludes inestables

GRIETAS FINAS. Pequeñas fisuras superficiales muy próximas la una con la otra, ya que no conforman un patrón regular y se extiende a cierta profundidad, pero no al espesor total de la carpeta.

Causas probables:

- Envejecimiento de la carpeta asfáltica
- Oxidación del asfalto



-
- Mala dosificación de asfalto

AGRIETAMIENTO PIEL COCODRILO. Fisuras en la superficie de la carpeta asfáltica, formando un patrón regular con polígonos hasta de 20 cms. Grietas interconectadas formando pequeños polígonos que asemejan la piel de un cocodrilo.

Causas probables:

- Soporte inadecuado de la base
- Debilidad de la estructura del pavimento
- Carpetas rígidas sobre los suelos de cimentación resilientes

AGRIETAMIENTO TIPO 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, con polígonos mayores a los 20 cms.

Causas probables:

- Calidad deficiente de alguna de las capas de la sección estructural
- Debilidad de la estructura del pavimento
- Carpetas rígidas sobre suelos de cimentación resilientes

GRIETA TRANSVERSAL. Agrietamiento de la carpeta que sigue un patrón transversal o perpendicular al eje del camino.

Causas probables:

- Acción del tránsito
- Reflejamiento de grietas en capas subyacentes
- Espesor insuficiente de la carpeta

AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL. Fisura o grieta paralela al eje del camino o en muchos casos sobre el eje del camino.



Causas probables:

- Deficiencias en la junta de construcción longitudinal
- Reflejo de grietas en capa de base
- Asentamiento de capas por el tránsito

2.5.4 VARIOS

LLORADO DE ASFALTO. Flujo de liberación del asfalto hacia la superficie de una carpeta asfáltica, formando una película o capa peligrosa y/o ascenso del asfalto a través de grietas.

Causas probables:

- Exceso de asfalto
- Excesiva compactación de mezclas ricas
- Temperatura de compactación muy elevada

AFLORAMIENTO DE HUMEDAD. Aparición de zonas húmedas en la superficie, con o sin encharcamiento.

Causas probables:

- Deficiencia de drenaje superficial
- Deficiencia o escasez de subdrenaje
- Flujo ascendente de agua a través de grietas

MARCADO DE HUELLA. Impresión en relieve localizada en la superficie de rodamiento.

Causas probables:

- Superficies de rodamiento débiles o suaves
- Exceso en el contenido de asfalto
- Altas temperaturas ambientales



EXPULSIÓN DE FINOS. Material fino sobre la superficie de rodamiento, acumulado en zonas adyacentes a las grietas, de color blancuzco.

Causas probables:

- Acumulación de gua libre en capas subyacentes
- Exceso de finos en capas de la sección del pavimento
- Expulsión de cemento a través de grietas, en bases estabilizadas

CRECIMIENTO DE HIERBA A TRAVÉS DE LA CARPETA. Producto de agrietamiento en acotamientos y en los hombros de la carretera; hierba silvestre crece aflorando por las grietas y avanzando con la humedad hasta prácticamente erosionar o destruir parte de la carpeta.

Causas probables:

- Drenaje superficial deficiente
- Labores de conservación inadecuadas
- Falta de sellado longitudinal

OBSTRUCCIÓN DE ALCANTARILLAS. La hierba silvestre invade y crece en alcantarillas para el drenaje, obstruyendo parcial o totalmente el flujo del agua, además de obstruir señalamiento geométrico.

Causas probables:

- Conservación inadecuada

OBSTRUCCIÓN DEL DRENAJE POR DESPRENDIMIENTO DE ROCAS. En taludes muy verticales es frecuente el desprendimiento de rocas sobre la carretera y en especial en los acotamientos para drenaje superficial. Lo anterior obstruye parcial o totalmente el flujo adecuado del agua por su drenaje, repercutiendo en el comportamiento de la sección del pavimento.



Causas probables:

- Falta de mantenimiento preventivo oportuno.

BORDE LONGITUDINAL O ELEVACIÓN DIFERENCIAL DE LA CARPETA ENTRE CARRILES. Cambio brusco del perfil transversal de la superficie de rodamiento entre tendido de capas.

Causas probables:

- Deficiencia en procedimientos constructivos
- Deficiencia en control de calidad
- Asentamientos longitudinales

Las causas que generan los daños en los pavimentos son identificadas con base en observaciones directas y con el conocimiento y experiencia se pueden clasificar el tipo de fallas estructurales.

2.6 INDICADORES ACTUALES DEL SECTOR CARRETERO EN MÉXICO

México desempeña un papel cada vez más relevante en el panorama internacional.

El sistema carretero del país está integrado por una extensa red de más de 366,807 km, repartidos de la siguiente manera.

- 48,844 kilómetros de carreteras federales y autopistas
- 78,267 kilómetros de caminos alimentadores o estatales
- 165,558 kilómetros de caminos rurales
- 74,138 kilómetros de brechas

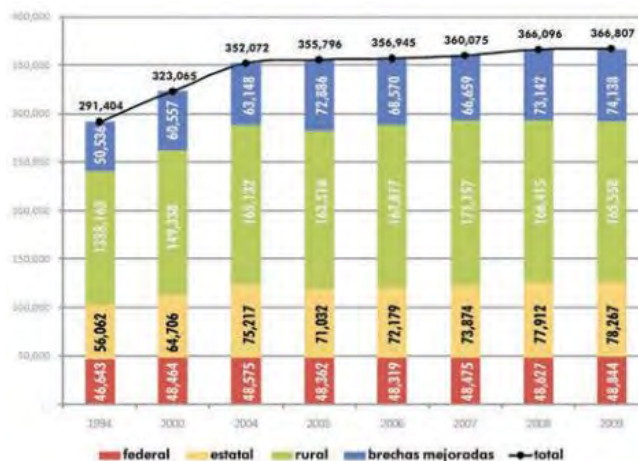


Figura 2.6 – COMPOSICIÓN DEL SISTEMA CARRETERO MEXICANO
FUENTE: SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT)

El estado superficial de dicha red está compuesto por 37.1% de kilómetros pavimentados, 40.3% revestidos y el 22.6% restante de terracerías y brechas mejoradas.

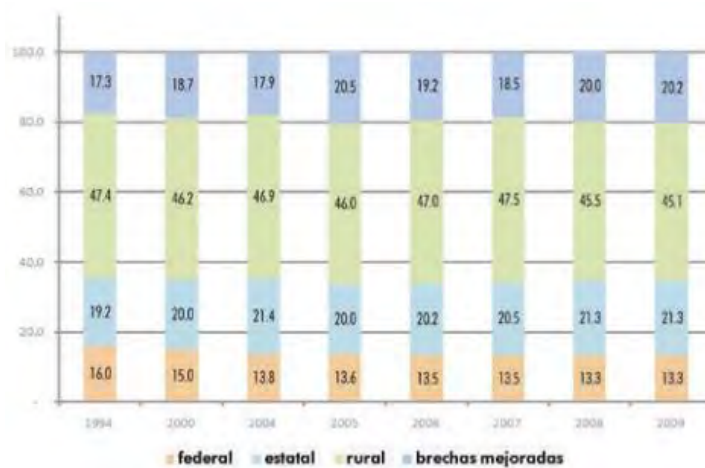


Figura 2.9 – ESTADO SUPERFICIAL DE LA RED DEL SISTEMA CARRETERO MEXICANO
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT)

Uno de los elementos más importantes que componen la red carretera lo constituyen los 15 corredores carreteros cuya longitud total es de 19,245 kilómetros. A la fecha, presentan una modernización de 82% de su longitud total.



Figura 2.10 – PRINCIPALES CORREDORES CARRETEROS
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT)

Estos corredores interconectan las cinco mesorregiones en que se divide el país, además de proporcionar el acceso y comunicación permanente a las principales ciudades, fronteras, centros turísticos y puertos marítimos.

Las cinco mesorregiones en que se encuentra dividido el país se describen brevemente a continuación.

- Noroeste: Esta mesoregión se localiza en la parte noroeste de la República mexicana; está integrada por Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y abarca una superficie de 384,417 kilómetros cuadrados.

- Noreste: La mesoregión del Noreste comprende cinco estados del norte del país, los cuales son Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y Durango y es la más extensa puesto que abarca una superficie de 663,797 kilómetros cuadrados.
- Centro-Occidente: La centro-occidente integra ocho de los estados de la parte central del país: Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato y San Luis Potosí, y abarca una superficie de 344,150 kilómetros cuadrados.
- Centro país: Esta mesoregión se compone por seis estados, los cuales son Hidalgo, Querétaro, Tlaxcala, Morelos, Estado de México y Distrito Federal, y abarca una superficie de 64,735 kilómetros cuadrados.
- Sur-Sureste: Por último la mesoregión sur-sureste, abarca nueve estados de la República Mexicana, Puebla, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo; abarca una superficie de 502,149 kilómetros cuadrados.



Figura 2.16 – MESORREGIONES EN QUE ESTÁ DIVIDIDO EL PAÍS
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT)



Durante las últimas administraciones, los montos de inversión destinados a la red carretera nacional mediante recursos públicos y privados representan cantidades muy importantes, como se puede observar en la figura 2.17, por lo que se puede decir que en la actual administración suman 207,514 millones de pesos (precios constantes de 2010), es decir, un promedio anual de 51,878 millones de pesos.

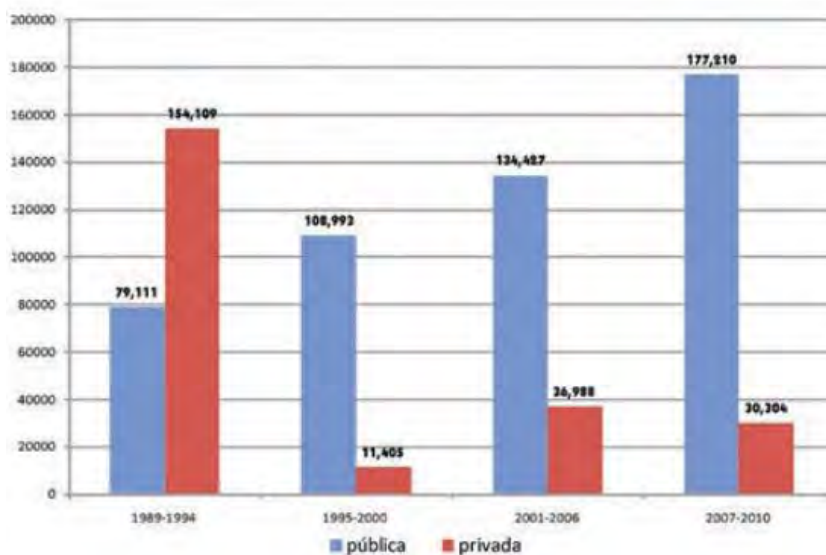


Figura 2.17 – INVERSIÓN PÚBLICA Y PRIVADA EN INFRAESTRUCTURA CARRETERA
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT)

La inversión pública autorizada para carreteras en sus diferentes programas (construcción y modernización; conservación, caminos rurales y programa de empleo temporal) ha venido creciendo durante los últimos años; basta citar que para el año 2010 el presupuesto aprobado es 8.7% más que el del año 2009. Lo que permitió disponer de recursos por un total de más de 54 mil millones de pesos.

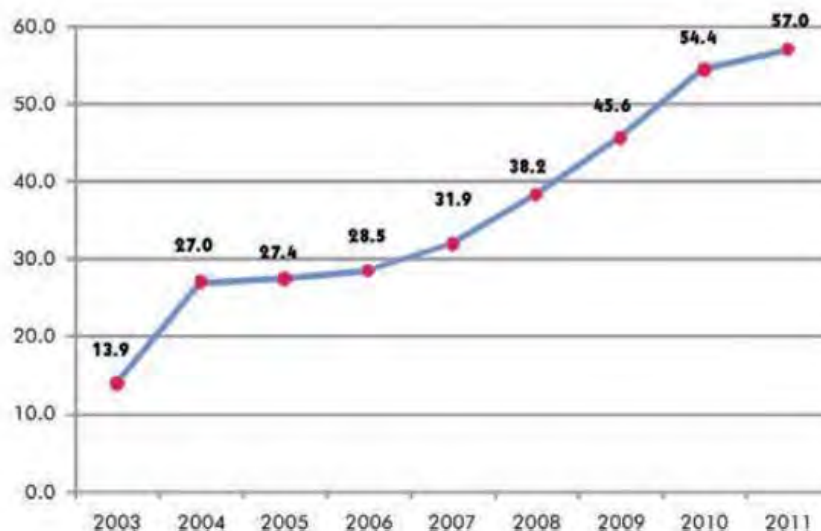


Figura 2.18 – INVERSIÓN EN CARRETERAS
FUENTE: SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES (SCT)

Por otra parte, el autotransporte federal de carga y pasajeros es la columna vertebral del sistema mexicano de transporte y una actividad fundamental para la economía nacional. Para el mismo año, movilizó 95% de los pasajeros transportados en el país, esto es, 160 millones de personas, y mostró un crecimiento de 20% con respecto a 1994, situación que obedece a la dinámica de la economía y actividad turística del país, así como al mejoramiento de los servicios de autotransporte.



2.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Tal como se describió en la introducción de este capítulo, el objetivo principal fue brindar toda la información necesaria para entender el pasado de la infraestructura carretera del país y pensar en lo que se necesita para solucionar los problemas del futuro. Pero, ¿de qué forma logramos entender el pasado de la infraestructura carretera?

Bueno, durante el primer capítulo supimos que a partir de las necesidades de crecimiento territorial y de comercio, los pobladores de cualquier región construían vías de comunicación para tener acceso a diferentes puntos del territorio en aquél entonces no explorado. En la actualidad, sucede lo mismo pero en diferente contexto, la construcción y ampliación de la red de carreteras surge de las mismas necesidades; crecimiento poblacional (extensión territorial) y crecimiento económico (comercio, transporte, etc.) y para lograr esto, es necesario construir carreteras a todo lo largo y ancho del país (corredores carreteros) lo cual implica una inversión del gobierno y particulares muy importante, por lo que es necesario contar con materiales de construcción económicos que sirvan para pavimentar las vías de comunicación terrestre, esto es, con pavimentos flexibles, los cuales y como ya se demostró a lo largo del capítulo, está constituido por diferentes capas que proporcionan la funcionalidad que se requiere para poder transportar los vehículos que transitan por todo el país y en las ciudades y lo más importante; son económicos.

Pero los pavimentos flexibles tienen comportamientos que no siempre son los deseados, es decir, sufren de desgastes y deterioros los cuales implican mantenimiento y correcciones, los cuales implican costos adicionales que no siempre son atendidos de forma inmediata. Surge allí la necesidad de construir con la ayuda de buenos diseños, que nos den la seguridad de contar con carreteras más resistentes y de mejor desempeño.



CAPÍTULO 3.-
MÉTODOS DE DISEÑO CONSIDERADOS
ACTUALMENTE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS
PAVIMENTOS FLEXIBLES



3 CAPÍTULO III.- MÉTODOS DE DISEÑO CONSIDERADOS ACTUALMENTE PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES

3.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

En el capítulo anterior se describieron los deterioros que existen en los pavimentos flexibles y algunas de las causas que los generan. La mayoría de éstos tienen en común fallas en alguna de las capas que conforman la estructura del pavimento y que pueden deberse a malas compactaciones en las terracerías, capas de subbase y base o en la carpeta asfáltica. Incluso, pueden deberse a un mal diseño; desde el inicio de la construcción del pavimento es en donde pueden comenzar los problemas que se verán reflejados a corto plazo. Fallas, grietas y deterioros.

Es por eso, que se considera importante abrir este capítulo para hacer mención de los métodos de diseño para pavimentos flexibles que existen desde hace años y que han ido evolucionando gracias a las pruebas de laboratorio con implementación de tecnología y que están a la disposición de los constructores pero que comúnmente no se respetan del todo, ya sea por cuestiones económicas o de tiempo. A veces la premura de las construcciones limita a las compañías constructoras elaborar un buen diseño y una buena planeación para la construcción de las carreteras.

Se mostrarán los aspectos a considerar para cada método estudiado, las tablas y gráficos que contempla cada uno y el proceso de análisis para el diseño de la estructura de un pavimento flexible.

El objetivo de este capítulo consiste en reforzar el conocimiento sobre las herramientas con las que contamos para el diseño de un pavimento. Debemos saber que cada método considera distintos datos de entrada, maneja de forma diferente la información, se basa en distintas tablas y gráficos para los cuales se



deben utilizar criterios basados en la experiencia y en la experimentación en los laboratorios, y así arrojarlos como resultado los espesores correctos para cada capa de la estructura del pavimento que necesitamos, de acuerdo a la solicitud del proyecto ejecutivo. Y sobre todo, que esté dentro del alcance del presupuesto.

Con la información obtenida, reafirmaremos la importancia que tiene la etapa del diseño en la construcción de las carreteras y también pueden servir como referente para la posible implementación de tecnologías de nueva generación, como lo veremos en el capítulo siguiente del presente trabajo.

Finalmente es importante mencionar que los métodos planteados serán estudiados en su forma tradicional, aunque actualmente se trabajan con programas de cómputo los cuales los hacen más eficientes, pero lo importante aquí es estudiar la esencia de cada uno de ellos y poder interpretarlos.



3.2 MÉTODO DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM.

Este método partió del análisis de datos experimentales en tramos de prueba, en carreteras en servicio, de investigación teórica y de experimentación en laboratorio en la pista circular de pruebas, que influyó más recientemente en sucesivos perfeccionamientos. Actualmente el método está preparado para ser manejado con la ayuda de gráficas, con calculadoras programables o con la ayuda de programas de cómputo. Se hará una breve descripción de la metodología de trabajo, correspondiente a la utilización de gráficos, nomogramas y ecuaciones de diseño.

Este método considera como datos de entrada básicos el tipo de carretera, el número de carriles, la vida de proyecto, el tránsito diario promedio anual (TDPA), tasa de crecimiento y variables adicionales sobre características del terreno y materiales, así como de climas, nivel freático y precipitación pluvial. Como guía para el proyectista, se recomienda la estimación de un Valor Relativo de Soporte crítico (\widehat{VRS}_2) para las condiciones previamente dadas (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. VALOR RELATIVO DE SOPORTE CRÍTICO ESTIMADO PARA EL DE PAVIMENTOS, PARA SUBRASANTES COMPACTADAS 95% DEL VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO PROCTOR.

Profundidad del nivel freático con relación al nivel de la capa considerada**, en m	\widehat{VRS}_2 , en porcentaje, mínimo probable***					
	Arena no plástica	Arcilla arenosa IP = 10	Arcilla arenosa IP = 20	Arcilla limosa IP = 30	Arcilla activa IP > 40	Limo
0.6	8-10	5-6	4-5	3-4	2-3	1
1.0	25	6-8	5-6	4-5	3-4	2-3
1.5	25	8-10	6-8	5-6	3-4	
2.0	25	8-10	7-9	5-6	3-4	
2.5	25	8-10	8-10	6-8	4-5	
3.0	25	25	8-10	7-9	4-5	Se requieren pruebas de laboratorio
3.5	25	25	8-10	8-10	4-5	
5.0	25	25	8-10	8-10	5-6	
7.0	25	25	8-10	8-10	7-9	

** De acuerdo con la variación estacional debe elegirse el nivel freático más alto.

*** Esta tabla se incluye únicamente con carácter cualitativo, y se refiere a \widehat{VRS}_2 mínimos. En todos los casos se deben de realizar pruebas de campo y ensayos de laboratorio para estimar el valor de diseño. El mínimo probable corresponde al caso de subrasantes colocadas bajo pavimentos impermeables.



En esta tabla se muestran valores estimados de \widehat{VRS} exclusivamente para materiales de subrasante, dependiendo de algunos tipos de materiales, sus índices plásticos y diferentes profundidades del nivel freático.

Se requieren adicionalmente pruebas de laboratorio confiables, para una mejor comprensión del comportamiento de las terracerías y demás capas a diseñar, debiendo realizarse para cada material propuesto y disponible, pruebas con tres diferentes energías de compactación; esto es, baja (AASHTO estándar) compactación intermedia y alta energía (AASHTO modificada).

Encontrando la humedad óptima y teniendo normado el porcentaje de compactación que se especifique en el proyecto y dependiendo del control de la construcción, se indicará un rango de variación de humedad respecto al óptimo. Paralelamente el laboratorio deberá reportar los valores de resistencia en VRS para cada tipo de material a utilizar.

Con el conjunto anterior, se encontrará una zona que reflejará las condiciones esperadas para la subrasante, encontrándose, en función de la humedad crítica esperada, el valor crítico de \widehat{VRS} de diseño (ver Figura 3.1 en Anexo 1).

En función del \widehat{VRS} crítico obtenido para la subrasante, por experiencia se asignará un valor menor para el cuerpo del terraplén, del orden del 60% obtenido para la subrasante.

Para obtener el \widehat{VRS} crítico de las capas restantes, esto es la subbase y base, el método emplea la siguiente ecuación, en donde interviene un coeficiente de variación estimado (v) entre 0.2 y 0.3, debido a cambios posibles del material, procedimiento constructivo, etc. Lo anterior, siempre tenderá a disminuir el VRS de campo promedio, que como ya se dijo cubrirá incertidumbres tanto de la prueba de valor relativo de soporte como de los materiales, redundando en lo que se conoce como factor de seguridad.



$$\widehat{VRS} = \overline{VRS} (1 - 0.84v)$$

El segundo paso contemplado en el método, consiste en la información y procesamiento de los datos del tránsito, partiendo del TDPA inicial, su tasa de crecimiento en porcentaje anual y la composición vehicular detallada, considerando desde los automóviles y vehículos ligeros hasta los vehículos más pesados de carga. Se hace notar que el método contempla en este análisis los porcentajes de vehículos pesados, tanto cargados con carga legal, como totalmente vacíos (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. EJEMPLO DE COMPOSICIÓN VEHICULAR CON PORCENTAJES DE CARGADOS Y VACÍOS.

TIPO DE VEHICULO	COMPOSICIÓN	PROPORCIÓN	
		CARGADOS	VACÍOS
AUTOMÓVILES			
CAMIONES LIGEROS (A2)			
AUTOBUSES (B2)			
CAMIONES DE DOS EJES (C2)			
CAMIONES DE TRES EJES (C3)			
TRACTORES CON SEMIREMOLQUE (T2-S1)			
TRACTORES CON SEMIREMOLQUE (T2-S2)			

Para el análisis del tránsito equivalente acumulado (ΣL), el método inicia el cálculo de los coeficientes de daño a diferentes profundidades de la estructura del pavimento, lo cual podrá procesarse con el empleo de la ecuación general No. 1.1.



Se deberá calcular el coeficiente de daño de cada vehículo tanto en condiciones de carga reglamentada y vacíos, para profundidades de $Z = 0$ cm para obtener los ejes equivalentes en carpeta y base, y $Z = 30$ cm para el resto de la sección.

$$\log d_i = \frac{\log \sigma_{z(i)} - \log \sigma_{z(eq)}}{\log A} = \frac{\log(pF_{z(i)}) - \log(5.8F_z)}{\log A} \quad (1.1)$$

Dónde:

d_i = Coeficiente de daño equivalente en la capa i .

σ_z = Esfuerzo a la profundidad z , en Kg/cm^2 .

p = Peso del eje, en Kg .

F_z = Coeficiente de influencia de Boussinesq a la profundidad z .

A = Constante experimental.

z = Profundidad en cm .

5.8 = Presión de contacto de la llanta en Kg/cm^2 .

Al obtenerse los coeficientes de daño para todos y cada uno de los vehículos vacíos y cargados a las profundidades $Z = 0$ y $Z = 30$, el proyectista deberá multiplicar éstos por la composición del tránsito en porcentaje. Con ello se obtendrá el Número de ejes equivalentes para cada vehículo y para cada profundidad. Al efectuar la sumatoria de tales valores en el carril de proyecto por el coeficiente de acumulación del tránsito C_T (Ecuación 1.2) y por el valor de TDPA inicial, se obtendrá el tránsito equivalente acumulado ΣL para las capas de carpeta y base, y subbase y terracerías respectivamente (Ver Figura 3.2 en Anexo 1).

$$C_T = 365 \sum_{j=1}^n (1+r)^{j-1} = 365 \left[\frac{(1+r)^n - 1}{r} \right] \quad (1.2)$$



Dónde:

C_T = Coeficiente de acumulación del tránsito.

n = Años de servicio.

r = Tasa de crecimiento anual.

Finalmente el método presenta un procedimiento sencillo para obtener los espesores equivalentes de diseño de la sección estructural del pavimento, procedimiento que incluye varios nomogramas que están en función del nivel de confianza Q_u que se elija, el Valor Relativo de Soporte Crítico de cada capa y el tránsito equivalente acumulado en ejes sencillos de 8.2 ton en el carril de proyecto, ver Figuras 3.3 y 3.4 en Anexo 1.

Con los nomogramas citados, el proyectista podrá obtener los espesores equivalentes para cada capa a las profundidades Z_N , tomando en cuenta coeficientes de resistencia estructural recomendados a_i , que considera 1 cm de asfalto equivalente a 2 cm de grava.

a_1D_1 = carpeta, D_1 espesor en cm, a_1 coeficiente equivalencia.

a_2D_2 = base, D_2 espesor en cm, a_2 coeficiente equivalencia.

a_nD_n = capa n, D_n espesor en cm, a_n coeficiente equivalencia.

Con lo anterior, el proyectista estará en posibilidades de determinar el espesor final de cada capa de la sección estructural del pavimento diseñado, interviniendo para ello los diferentes criterios que adopte para una mejor estructuración de la sección carretera, tomando en cuenta ciertos arreglos de capas, ciertas clases de materiales y mínimos espesores que se tienen especificados por la dependencia o autoridad responsable.



3.3 MÉTODO DE DISEÑO ESPAÑOL MOPU - SECCIONES DE PAVIMENTO

El Catálogo considera períodos de diseño o de servicio de 20 años para los pavimentos flexibles y de 30 años para los pavimentos rígidos elaborados con concreto hidráulico. También toma en cuenta la intensidad media diaria de vehículos pesados que se prevea en el carril de proyecto y en el año de la puesta en servicio. Se utilizan para el diseño tres categorías de subrasante, definidas por su mínimo valor relativo de soporte (VRS). En base a las variables anteriores, el Catálogo proporciona 13 alternativas de solución para 5 diferentes tránsitos, 3 categorías de subrasantes y 8 clases de materiales diferentes, para usarse en las capas de la sección estructural de los pavimentos. Todo lo anterior se traduce finalmente en un Catálogo que proporciona al usuario o diseñador un abanico del orden de 500 secciones de pavimento.

3.3.1 TRÁNSITO.

Para el diseño de secciones estructurales de los pavimentos flexibles o rígidos, el método español considera exclusivamente los “vehículos pesados”, mismos que define de la siguiente manera:

- Camiones de carga útil superior a 3 Ton, de más de 4 ruedas y sin remolque.
- Camiones con uno o varios remolques.
- Vehículos articulados.
- Vehículos especiales.
- Vehículos de pasajeros con más de 9 plazas.



El Catálogo contempla categorías de tránsito pesado desde el T0 hasta el T4, cubriendo intensidades medias diarias de vehículos pesados entre 50 y más de 2,000 vehículos sobre el carril de diseño. Cuando no se dispone de datos confiables del aforo vehicular, se admite la asignación por carriles siguiente:

- En superficies de rodamiento de dos carriles y doble sentido de circulación, incide sobre cada carril la mitad de los vehículos pesados.
- En superficies de rodamiento de cuatro carriles (dos por sentido de circulación), inciden sobre el exterior todos los vehículos pesados que circulen en el sentido considerado.
- En superficies de rodamiento de tres o más carriles por sentido de circulación, incide sobre el exterior el 85% de los vehículos pesados que circulen en el sentido considerado.
- Para efectos de utilización del presente método, en la Tabla 3.3 se definen cinco categorías de tránsito pesado, en función de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp), en el carril de proyecto y en el año de la puesta en servicio.

Tabla 3.3. CATEGORÍAS DE TRÁNSITO PESADO.

CATEGORIAS DE TRÁNSITO PESADO	IMDp
T0	MAYOR DE 2,000
T1	ENTRE 800 Y 2,000
T2	ENTRE 200 Y 800
T3	ENTRE 50 Y 200
T4	MENOR DE 50

Para el diseño de nuevas construcciones de autopistas y carreteras, recomiendan que en ningún caso la categoría seleccionada sea inferior a T 1, que involucra una IMDp entre 800 y 2,000 vehículos pesados y, cuando se justifique



que los ejes de los vehículos pesados estén sobrecargados, se deberá adoptar la categoría inmediata superior.

3.3.2 SUBRASANTE.

El Catálogo considera 3 categorías de subrasante, definidas por el índice VRS mínimo; esto es: E 1, entre 5 y 10, E 2, entre 10 y 20 y E 3, para índices mayores de 20 por ciento, determinados por los métodos de ensaye especificados y en las condiciones más desfavorables de humedad y densidad.

Se hace notar que el método no admite subrasantes del tipo E 1 para categorías de tránsito pesado T 0 y T 1 y además para esos casos se recomienda la utilización de materiales estabilizados con cal o cemento. En la Tabla 3.4, se sugieren algunos materiales utilizables en las subrasantes.

Tabla 3.4 MATERIALES UTILIZABLES EN SUBRASANTES

Símbolo	Definición del material	Artículo correspondiente del PPTG	Prescripciones complementarias
0	Suelo tolerable	330 Terraplenes	
1	Suelo adecuado	330 Terraplenes	
2	Suelo seleccionado	330 Terraplenes	
3	Suelo seleccionado	330 Terraplenes	VRS \geq 20
T	Material de la zona de transición en pedraplenes	511 Suelos estabilizados in situ con cemento 510 Suelos estabilizados in situ con cal	
S-EST 1	Suelo etabilizado in situ con cemento o con cal	330 Terraplenes 511 Suelos estabilizados in situ con cemento 510 Suelos estabilizados in situ con cal	VRS de la mezcla a los 7 días \geq 5 (cemento o cal \geq 2%).
S-EST 2	Suelo adecuado estabilizado in situ con cemento o con cal	330 Terraplenes 511 Suelos estabilizados in situ con cemento	VRS de la mezcla a los 7 días \geq 10 (cemento o cal \geq 3%).
S-EST 3	Suelo adecuado estabilizado in situ con cemento o con cal		Resistencia a compresión simple a los 7 días \geq 1.5 Mpa.



3.3.3 MATERIALES PARA CAPAS SUPERIORES.

El Catálogo recomienda que para las categorías de tránsito pesado T 0, T 1 y T 2 (o sea intensidades diarias mayores a 200 vehículos pesados en el carril de diseño) se utilicen exclusivamente mezclas asfálticas en caliente o concreto hidráulico para la superficie de rodamiento. En los casos de tránsitos pesados con categorías T3 o T4 (IMDp entre 50 y 200) se permite el empleo de mezclas asfálticas en frío, además de las mezclas en caliente, pero se restringen los espesores mínimos de la capa citada a 4 y 5 cm. Para la categoría T4 se permiten 4 cm de mezcla asfáltica sellada con tratamiento superficial.

El Catálogo también cubre brevemente características para los tratamientos superficiales con lechada asfáltica, concreto compactado con rodillos, suelo - cemento, agregados pétreos artificiales o naturales, riego de sello con gravilla, riego de liga y de curado.

Finalmente, se hace notar que el Catálogo proporciona recomendaciones de materiales y de dimensionamiento geométrico para los pavimentos en carreteras, tanto flexibles como rígidos, relativos a espesores, anchos de acotamientos, juntas longitudinales y transversales para la superficie de rodamiento, texturas abiertas o cerradas, drenaje superficial y subdrenaje, etc.

- En las Tablas 3.5 a 3.9 se muestra un resumen que involucra los parámetros de entrada y todas las posibles soluciones de las secciones requeridas. Para cada categoría de tránsito pesado (T 0, T 1, T 2, T 3 y T 4) se proporcionan 6 o 7 soluciones para cada tipo de subrasante (E 1, E 2 y E 3) y se consideran de 7 a 8 diferentes clases de materiales. Lo anterior representa 85 secciones de pavimento numeradas del 021 al 436 con los siguientes arreglos:



Sección Catálogo N°:

14 secciones para el tránsito T 0; (021 - 037)

14 secciones para el tránsito T 1; (121 - 137)

21 secciones para el tránsito T 2; (211 - 237)

18 secciones para el tránsito T 3; (311 - 336)

18 secciones para el tránsito T 4; (411 - 436)

Total 85 secciones

Se observa, como ya se mencionó en el segundo párrafo del inciso 3.2.2, la variable de tránsito, que no se permite ninguna sección estructural de pavimento para las categorías de tránsito T 0 y T 1 apoyadas sobre subrasantes clase E 1.

Adicionalmente, el Catálogo detalla para las secciones propuestas en la Tablas 3.5 a 3.9 del Anexo 1, varias alternativas de solución de pavimentos para la superficie de rodamiento y acotamiento exterior, que el diseñador deberá consultar para proponer la mejor opción en función de los costos y la disponibilidad de materiales.

El catálogo español, propone algunas variantes de resistencia equivalente a las contenidas en las secciones de las tablas anteriores y eso es buscando posibilidad de utilización con diferentes materiales previendo que algunos de los señalados en la sección tipo no se encuentren en disponibilidad.



3.4 MÉTODO DE DISEÑO DEL INSTITUTO DEL ASFALTO DE LOS EUA.

El método más reciente del Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de Norteamérica, editado en 1991 y publicado en 1993, presenta algunos cambios significativos, respecto a los métodos anteriores para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles. El método se basa principalmente en la aplicación de la teoría elástica en multicapas, que utiliza resultados de investigaciones recientes por parte de ese organismo.

El manual presenta un procedimiento de diseño para obtener los espesores de la sección estructural de pavimentos, donde se utilizan el cemento asfáltico y las emulsiones asfálticas en toda la sección o en parte de ella. Se incluyen varias combinaciones de superficies de rodamiento con concreto asfáltico, carpetas elaboradas con emulsiones asfálticas, bases asfálticas y bases o subbases granulares naturales. Sin embargo, se reconoce que por los avances en la tecnología de los pavimentos asfálticos, se requieren más conocimientos sobre las propiedades de los materiales para las necesidades actuales de los sistemas carreteros, por lo que el método vigente, probablemente requiera revisión e implementación futuras.

3.4.1 ESTIMACIÓN DEL TRÁNSITO.

El método actual distingue el “Período de Diseño” del “Período de Análisis”, de la siguiente manera:

Un pavimento debe ser diseñado para soportar los efectos acumulados del tránsito para cualquier período de tiempo; el período seleccionado, en años, se define como “Período de Diseño”. Al término de éste, se espera que el pavimento requiera alguna acción de rehabilitación mayor, como puede ser una sobrecarpeta de refuerzo para restaurar su condición original.



La vida útil del pavimento, o “Período de Análisis”, puede ser extendida indefinidamente, a través de sobrecarpetas u otras acciones de rehabilitación, hasta que la carretera sea obsoleta por cambios significativos en pendientes, alineamiento geométrico y otros factores. En la versión reciente, el método considera períodos de diseño de uno a 35 años y tasas de crecimiento del tránsito del 2 al 10% anual. (Ver Tabla 3.10).

Tabla 3.10. TASA ANUAL DE CRECIMIENTO DEL TRÁNSITO.

Período de Diseño, años (n)	Tasa Anual de Crecimiento, en por ciento.						
	2	4	5	6	7	8	10
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	2.02	2.04	2.05	2.00	2.07	2.08	2.10
3	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.31	6.03	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	14.68	16.03	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

Para el cálculo del porcentaje de camiones en el flujo vehicular sobre el carril de diseño, el actual método recomienda los siguientes valores:



Tabla 3.11. PORCENTAJE DE CAMIONES EN EL CARRIL DE DISEÑO.

No DE CARRILES EN AMBAS DIRECCIONES	% DE CAMIONES EN EL CARRIL DE DISEÑO
2	50
4	45
6 o más	40

El método proporciona en la Tabla 3.12, factores de equivalencia de la carga o coeficientes de daño para ejes sencillos, dobles o triples, incluyendo cargas sobre el eje desde 0.5 toneladas (1,000lb) hasta 41 toneladas (90,000 lb), lo que se considera cubre sobradamente cualquier condición de peso de vehículos de carga en cualquier red de carreteras, desde rurales hasta grandes autopistas.

Tabla 3.12. FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA.

Carga Total por Eje o Conjunto de Ejes.		Factores de Equivalencia de Carga.		
Kn	lb	Eje Sencillo	Ejes dobles	Ejes Triples
4.45	1,000	0.00002		
8.9	2,000	0.00018		
17.8	4,000	0.00209	0.0003	
26.7	6,000	0.01043	0.001	0.0003
35.6	8,000	0.0343	0.003	0.001
44.5	10,000	0.0877	0.007	0.002
53.4	12,000	0.189	0.014	0.003
62.3	14,000	0.360	0.027	0.006
71.2	16,000	0.623	0.047	0.011
80.0	18,000	1.000	0.077	0.017
89.0	20,000	1.51	0.121	0.027
97.9	22,000	2.18	0.180	0.040
106.8	24,000	3.03	0.260	0.057
115.6	26,000	4.09	0.364	0.080
124.5	28,000	5.39	0.495	0.109
133.4	30,000	6.97	0.658	0.145
142.3	32,000	8.88	0.857	0.191
151.2	34,000	11.18	1.095	0.248
160.1	36,000	13.93	1.38	0.313
169.0	38,000	17.20	1.70	0.393
178.0	40,000	21.08	2.08	0.487
187.0	42,000	25.64	2.51	0.597
195.7	44,000	31.00	3.00	0.723
204.5	46,000	37.24	3.55	0.868
213.5	48,000	44.50	4.17	1.033
222.4	50,000	52.88	4.86	1.22
231.3	52,000		5.63	1.43
240.2	54,000		6.47	1.66
249.0	56,000		7.41	1.91
258.0	58,000		8.45	2.20
267.0	60,000		9.59	2.51
275.8	62,000		10.84	2.85
284.5	64,000		12.22	3.22
293.5	66,000		13.73	3.62
302.5	68,000		15.38	4.05
311.5	70,000		17.19	4.52
320.0	72,000		19.16	5.03
329.0	74,000		21.32	5.57
338.0	76,000		23.66	6.15
347.0	78,000		26.22	6.78
356.0	80,000		29.00	7.45
364.7	82,000		32.00	8.2
373.6	84,000		35.30	8.9
382.5	86,000		38.80	9.8
391.4	88,000		42.60	10.6
400.3	90,000		46.80	11.6



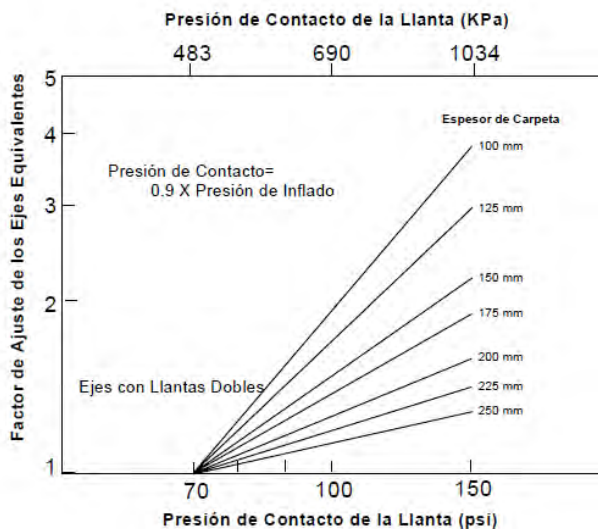
Habiéndose obtenido los coeficientes por cada eje o conjunto de ejes, la suma proporcionará el coeficiente total de equivalencia del vehículo. Utilizando el factor o tasa anual de crecimiento del tránsito señalado en la Tabla 3.10, y multiplicándolo por los coeficientes totales de equivalencia y por el número de vehículos del aforo del tránsito promedio anual, se obtienen los ejes equivalentes acumulados reales para el período de diseño considerado.

Como innovación en la versión actual, el método incorpora factores de ajuste de los ejes equivalentes de diseño, para diferentes presiones de contacto de las llantas sobre el pavimento, en función de su presión de inflado y de los espesores de la carpeta asfáltica, donde contempla desde cuatro hasta diez pulgadas de espesor (10 y 25 cm respectivamente). Ver Figura 3.5.

NOTA: Al margen del método de diseño que se describe y como consecuencia de estudios realizados en México por el Instituto Mexicano del Transporte, aparece la posibilidad de aplicar el método comentado con una innovación que se desprende del Estudio Estadístico del Transporte Carretero que realiza la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Como consecuencia de dicho estudio, pueden afinarse, para el caso de México, las condiciones de carga con que realmente operan los vehículos tomando en cuenta los que circulan en vacío, los que lo hacen con diferentes porcentajes de carga por abajo del valor reglamentario, los que se ciñen a ese valor, y los que lo hacen con diferentes porcentajes de carga por arriba de dicho valor reglamentario. Esta información, actualmente disponible para las condiciones de operación mexicanas, permite la estimación de ejes de diseño con un grado de aproximación mucho mayor, no ya dependiente de valores fijos de carga vehicular, sino de las cargas que realmente pueden asociarse a los diferentes tipos de vehículos en las carreteras de México.



Figura 3.5. FACTOR DE AJUSTE DE LOS EJES EQUIVALENTES POR PRESIÓN DE LA LLANTA.



3.4.2 EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES.

Para el diseño de los espesores de una sección estructural del pavimento flexible, el método actual del Instituto del Asfalto, considera como parámetro fundamental, dentro de la evaluación de los materiales, la obtención del Módulo de Resiliencia (M_r), con recomendaciones del método de prueba descrito en el Manual de Suelos MS-10 del propio Instituto. Sin embargo, reconocen que no todos los organismos o dependencias tienen el equipo adecuado para llevar a cabo tal prueba, por lo que han establecido factores de correlación entre M_r y la prueba estándar de Valor Relativo de Soporte (T-193 de AASHTO). Señalan que los resultados son bastante aproximados; sin embargo, para un diseño preciso, se recomienda llevar a cabo la prueba del Módulo de Resiliencia para la capa de la subrasante.

Factores Recomendados de Correlación

$$M_r (\text{Mpa}) = 10.3 \text{ CBR}$$

$$M_r (\text{psi}) = 1,500 \text{ CBR}$$



Se hace notar que tales correlaciones sólo se aplican a materiales de la capa subrasante, no sirviendo para materiales granulares que se pretendan emplear en las capas de subbase o de la base.

Otro cambio importante en la actual metodología descrita, es la inclusión de métodos de prueba normados según AASHTO y ASTM para los siguientes parámetros:

Límite Líquido T89 y D4318, Límite Plástico T90 y D4318, Índice Plástico T90 y D4318, Granulometría T88 y D422, Compactación T180 y D1557, Valor Relativo de Soporte T193 y D1883, Valor R T190 y D2844 y para el Módulo de Resiliencia Mr se recomienda utilizar el método MS-10 del propio Instituto.

En función del tránsito esperado sobre el pavimento en estudio, el método del Instituto del Asfalto recomienda los siguientes valores percentiles para calcular el Módulo de Resiliencia de diseño de la capa subrasante.

Tabla 3.13. VALOR PERCENTIL PARA DISEÑO DE SUBRASANTE, DE ACUERDO AL NIVEL DEL TRÁNSITO.

NIVEL DEL TRÁNSITO	VALOR PERCENTIL PARA DISEÑO DE SUBRASANTE
Menor de 10, 000 ejes equivalentes	60
Entre 10, 000 y 1, 000, 000 de ejes equivalentes	75
Mayor de 1, 000, 000 de ejes equivalentes	87.5

Con las muestras de material obtenidas en el campo y con los resultados obtenidos en el laboratorio para determinar sus Módulos de Resiliencia, el diseñador deberá calcular el Mr de diseño de la capa subrasante, con los percentiles sugeridos en la Tabla anterior.

Para los requerimientos de compactación en las capas de base y subbase, el actual método proporciona las siguientes recomendaciones:



Capas de base y subbase formadas con materiales granulares sin tratamiento, esto es, no estabilizadas, deberán compactarse con un contenido de humedad óptimo más menos 1.5 puntos en porcentaje, para alcanzar una densidad mínima del 100% de la densidad máxima de laboratorio, sugiriendo se utilice el Método AASHTO T180 o el ASTM D1557.

Así mismo, recomienda los siguientes valores para las diferentes pruebas a realizarse con materiales de bases y subbases:

Tabla 3.14. VALORES PARA DIFERENTES PRUEBAS, CON MATERIALES DE BASES Y SUBBASES.

PRUEBA	REQUISITOS SUBBASE	REQUISITOS BASE
VRS, mínimo	20	80
Valor R, mínimo	55	78
Límite Líquido, máximo	25	25
Índice Plástico, máximo	6	NP
Equivalente de Arena, mínimo	25	35
Material que pasa la malla 200, máximo, (finos)	12	7

El Instituto Mexicano del Transporte recomienda los valores siguientes:

Tabla 3.15. VALORES RECOMENDADOS POR EL I.M.T.

I.M.T.	SUBBASE	BASE
%FINOS	15 – 25	10 – 15
LIMITE LIQUIDO	25 – 30	25 – 30
INDICE PLÁSTICO	6 – 10	6 – 6
VRS	40 - 30	100 - 80

Es importante hacer notar, que dentro de las innovaciones que presenta el método de diseño del Instituto del Asfalto, además de las anteriormente descritas, el método contempla factores de medio ambiente y varios tipos o clases de asfalto según las necesidades particulares de los usuarios. Esto es, tres diferentes temperaturas, según la región donde se pretenda construir el pavimento, climas fríos, templados y calientes, 7°C, 15.5°C y 24°C, respectivamente, empleando



cementos asfálticos desde el AC-5 hasta el AC-40, recomendándose la clasificación siguiente:

Tabla 3.16. GRADOS DE ASFALTO DE ACUERDO AL TIPO DE CLIMA.

CLIMA	TEMPERATURA	GRADOS DE ASFALTO
FRÍO	MENOR O IGUAL A 7°C	AC - 5 , AC - 10
TEMPLADO	ENTRE 7 Y 24°C	AC - 10 , AC - 20
CALIENTE	MAYOR QUE 24°C	AC - 20 , AC - 40

Para mezclas asfálticas emulsificadas, se pueden utilizar tanto emulsiones catiónicas (ASTM D2397) o aniónicas (ASTM D977). El grado o tipo de asfalto a seleccionarse, dependerá principalmente de su habilidad para cubrir los agregados, además de factores como la disponibilidad de agua en el sitio de trabajo, clima durante la construcción, procedimiento de mezclado y curado del material.

En cuanto a requerimientos de espesores mínimos, en función del nivel de tránsito en ejes equivalentes, el método recomienda los siguientes valores:

A) Para superficies de concreto asfáltico construidas sobre bases emulsificadas:

Tabla 3.17. ESPESORES MÍNIMOS DE CARPETA ASFÁLTICA, DE ACUERDO AL NIVEL DEL TRÁNSITO.

NIVEL TRÁNSITO EN EJES EQUIVALENTES	ESPEOR MÍNIMO DE CARPETA ASFÁLTICA EN CM (1)
10,000	5.0
100,000	5.0
1'000,000	7.5
10'000,000	10.0
Mayor de 10'000,000	13.0

(1) Podrá usarse concreto asfáltico o mezclas asfálticas emulsificadas Tipo I con un tratamiento superficial, sobre bases asfálticas tipo II o Tipo III.

Tipo I: Mezclas elaboradas con agregados, textura cerrada.

Tipo II: Mezclas elaboradas con agregados semi-procesados.

Tipo III: Mezclas elaboradas con arenas o arenas-limosas.



B) Para superficies de concreto asfáltico, construidas sobre bases granulares sin estabilizar:

Tabla 3.18. ESPESORES DE SUPERFICIE DE CONCRETO ASFÁLTICO SOBRE BASES GRANULARES SIN ESTABILIZAR.

NIVEL TRÁNSITO EN EJES EQUIVALENTES	CONDICIÓN TRÁNSITO	ESPESOR MÍNIMO DE CARPETA ASFÁLTICA EN CM
Hasta 10,000	Ligero	7.5 (2)
Entre 10,000 y 1'000,000	Mediano	10.0
Mayor de 1'000,000	Pesado	12.5 ó más

(2) Para pavimentos de una sola capa formada con concreto asfáltico (full - depth) o pavimentos con emulsiones asfálticas, se requiere un mínimo de 10 cm.

3.4.3 CÁLCULOS DE ESPESORES DE DISEÑO.

El método más reciente del Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de Norteamérica, proporciona para el diseño final de los espesores de la sección estructural del pavimento flexible, 18 gráficas o cartas de diseño en sistema métrico y 18 en sistema inglés, las cuales cubren todas las variables involucradas en los párrafos anteriores de este trabajo.

Para fines prácticos de este trabajo, se incluyen solamente 3 cartas de diseño en sistema métrico, (ver Figuras 3.6, 3.7 y 3.8 en el Anexo 1) dejando que el usuario pueda obtener el espesor total de la estructura de concreto asfáltico, mismo que podrá convertir en una estructura multicapa, formada por la carpeta de rodamiento, base y subbase, empleando los coeficientes estructurales recomendados por la AASHTO para esas capas o los coeficientes de equivalencia sugeridos por el mismo Instituto del Asfalto o los Métodos de California. Adicionalmente, se sugiere al diseñador, consultar con mayor detalle los espesores finales que reportan en las 18 gráficas en sistema métrico, que proporciona el Método del Instituto del Asfalto en su Manual MS-1, o en su versión computarizada "HWY" que incluye el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles y el diseño de sobrecarpetas de refuerzo.



3.5 MÉTODO DE LA AASHTO PARA EL DISEÑO DE LA SECCIÓN ESTRUCTURAL DE LOS PAVIMENTOS.

El actual método de la AASHTO, versión 1993, describe con detalle los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles y rígidos de carreteras. En el caso de los pavimentos flexibles, el método establece que la superficie de rodamiento se resuelve solamente con concreto asfáltico y tratamientos superficiales, pues asume que tales estructuras soportarán niveles significativos de tránsito (mayores de 50,000 ejes equivalentes acumulados de 8.2 ton durante el período de diseño), dejando fuera pavimentos ligeros para tránsitos menores al citado, como son los caminos revestidos o de terracería.

3.5.1 MÉTODO DE DISEÑO.

Los procedimientos involucrados en el actual método de diseño, versión 1993, están basados en las ecuaciones originales de la AASHO que datan de 1961, producto de las pruebas en Ottawa, Illinois, con tramos a escala natural y para todo tipo de pavimentos. La versión de 1986 y la actual de 1993 se han modificado para incluir factores o parámetros de diseño que no habían sido considerados y que son producto de la experiencia adquirida por ese organismo entre el método original y su versión más moderna, además de incluir experiencias de otras dependencias y consultores independientes.

El diseño está basado primordialmente en identificar o encontrar un “número estructural SN” para el pavimento flexible que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para determinar el número estructural SN requerido, el método proporciona la ecuación general y la gráfica de la Figura 3.9 del Anexo 1, que involucra los siguientes parámetros:

1. El tránsito en ejes equivalentes acumulados para el período de diseño seleccionado, “ W_{18} ”.



2. El parámetro de confiabilidad, “R”.
3. La desviación estándar global, “S_o”.
4. El módulo de resiliencia efectivo, “M_r” del material usado para la subrasante.
5. La pérdida o diferencia entre los índices de servicios inicial y final deseados, “ΔPSI”.

3.5.2 TRÁNSITO.

Para el cálculo del tránsito, el método actual contempla los ejes equivalentes sencillos de 18,000 lb (8.2 ton) acumulados durante el período de diseño, por lo que no ha habido grandes cambios con respecto a la metodología original de AASHTO. Solamente se aconseja que para fines de diseño en “etapas o fases” se dibuje una gráfica donde se muestre año con año, el crecimiento de los ejes acumulados (ESAL) vs tiempo, en años, hasta llegar al fin del período de diseño o primera vida útil del pavimento. La ecuación siguiente puede ser usada para calcular el parámetro del tránsito W_{18} en el carril de diseño.

$$W_{18} = DD * D_L * W_{E18} \quad (4.1)$$

Dónde:

W_{18} = Tránsito acumulado en el primer año, en ejes equivalentes sencillos de 8.2 ton, en el carril de diseño.

DD = Factor de distribución direccional; se recomienda 50% para la mayoría de las carreteras, pudiendo variar de 0.3 a 0.7, dependiendo de en qué dirección va el tránsito con mayor porcentaje de vehículos pesados.

W_{E18} = Ejes equivalentes acumulados en ambas direcciones.

D_L = Factor de distribución por carril, cuando se tengan dos o más carriles por sentido. Se recomiendan los siguientes valores:



Tabla 3.19. FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL.

Nº CARRILES EN CADA SENTIDO		PORCENTAJE DE W_{18} EN EL CARRIL DE DISEÑO
1		100
2		80 - 100
3		60 - 80
4 o más		50 - 75

Una vez calculados los ejes equivalentes acumulados en el primer año, el diseñador deberá estimar con base en la tasa de crecimiento anual y el período de diseño en años, el total de ejes equivalentes acumulados y así contar con un parámetro de entrada para la ecuación general o para el nomograma de la Figura 3.9 del Anexo 1.

Es importante hacer notar que la metodología original de AASHTO usualmente consideraba períodos de diseño de 20 años; en la versión actual de 1993, recomienda los siguientes períodos de diseño en función del tipo de carretera:

Tabla 3.20. PERIODOS DE DISEÑO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CARRETERA.

TIPO DE CARRETERA:	PERÍODO DE DISEÑO
Urbana con altos volúmenes de tránsito.	30 - 50 años
Interurbana con altos volúmenes de tránsito.	20 - 50 años
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito.	15 - 25 años
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito.	10 - 20 años



3.5.3 CONFIABILIDAD “R”.

Con el parámetro de Confiabilidad “R”, se trata de llegar a cierto grado de certeza en el método de diseño, para asegurar que las diversas alternativas de la sección estructural que se obtengan, durarán como mínimo el período de diseño. Se consideran posibles variaciones en las predicciones del tránsito en ejes acumulados y en el comportamiento de la sección diseñada.

El actual método AASHTO para el diseño de la sección estructural de pavimentos flexibles, recomienda valores desde 50 y hasta 99.9 para el parámetro “R” de confiabilidad, con diferentes clasificaciones funcionales, notándose que los niveles más altos corresponden a obras que estarán sujetas a un uso intensivo, mientras que los niveles más bajos corresponden a obras o caminos locales y secundarios.

Tabla 3.21. VALORES DE “R” DE CONFIABILIDAD, CON DIFERENTES CLASIFICACIONES FUNCIONALES.

* NIVELES DE CONFIABILIDAD	
CLASIFICACIÓN FUNCIONAL:	NIVEL RECOMENDADO POR AASHTO PARA CARRETERAS
Carretera Interestatal o Autopista.	80 - 99.9
Red Principal o Federal.	75 - 95
Red Secundaria o Estatal.	75 - 95
Red Rural o Local.	50 - 80

3.5.4 DESVIACIÓN ESTÁNDAR GLOBAL “SO”.

Este parámetro está ligado directamente con la Confiabilidad (R), descrita en el punto (3.4.3.); habiéndolo determinado, en este paso deberá seleccionarse un valor S_o “Desviación Estándar Global”, representativo de condiciones locales particulares, que considera posibles variaciones en el comportamiento del pavimento y en la predicción del tránsito.



Valores de “ S_o ” en los tramos de prueba de AASHO no incluyeron errores en la estimación del tránsito; sin embargo, el error en la predicción del comportamiento de las secciones en tales tramos, fue de 0.25 para pavimentos rígidos y 0.35 para los flexibles, lo que corresponde a valores de la desviación estándar total debidos al tránsito de 0.35 y 0.45 para pavimentos rígidos y flexibles respectivamente.

3.5.5 MÓDULO DE RESILIENCIA EFECTIVO.

En el método actual de la AASHO, la parte fundamental para caracterizar debidamente a los materiales, consiste en la obtención del Módulo de Resiliencia, con base en pruebas de laboratorio, realizadas en materiales a utilizar en la capa subrasante (Método AASHO T-274), con muestras representativas (esfuerzo y humedad) que simulen las estaciones del año respectivas. El módulo de resiliencia “estacional” será obtenido alternadamente por correlaciones con propiedades del suelo, tales como el contenido de arcilla, humedad, índice plástico, etc.

Finalmente, deberá obtenerse un “módulo de resiliencia efectivo”, que es equivalente al efecto combinado de todos los valores de módulos estacionales.

Para la obtención del módulo estacional, o variaciones del M_r a lo largo de todas las estaciones del año se ofrecen dos procedimientos: uno, obteniendo la relación en el laboratorio entre el módulo de resiliencia y el contenido de humedad de diferentes muestras en diferentes estaciones del año y, dos, utilizando algún equipo para medición de deflexiones sobre carreteras en servicio durante diferentes estaciones del año.

Sin embargo, para el diseño de pavimentos flexibles, únicamente se recomienda convertir los datos estacionales en módulo de resiliencia efectivo de la capa subrasante, con el auxilio de la Figura 3.14 del Anexo 1 que proporciona un valor sopesado en función del “daño equivalente anual” obtenido para cada estación en particular.



También puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$Uf = 1.18 \times 10^8 * M R^{-2.32} \quad (4.2)$$

Uf = Daño relativo en cada estación (por mes o quincenal).

MR = Módulo de Resiliencia de la capa subrasante, obtenido en laboratorio o con deflexiones cada quincena o mes.

Y por último:

$$\bar{Uf} = \text{promedio de daño relativo} = \frac{\sum Uf}{n}$$

Por lo que el M_R efectivo, será el que corresponda al \bar{Uf} promedio (Ecuación 4.2).

3.5.6 PÉRDIDA O DIFERENCIA ENTRE ÍNDICES DE SERVICIO INICIAL Y TERMINAL.

El cambio o pérdida en la calidad de servicio que la carretera proporciona al usuario, se define en el método con la siguiente ecuación:

PSI = Índice de Servicio Presente

$$\Delta PSI = p_o - p_t \quad (4.3)$$

Dónde:

ΔPSI = Diferencia entre los índices de servicio inicial u original y el final o terminal deseado.

p_o = Índice de servicio inicial (4.5 para pavimentos rígidos y 4.2 para flexibles).

p_t = Índice de servicio terminal, para el cual AASHTO maneja en su versión 1993 valores de 3.0, 2.5 y 2.0, recomendando 2.5 o 3.0 para caminos principales y 2.0 para secundarios.



3.5.7 DETERMINACIÓN DE ESPESORES POR CAPAS.

Una vez que el diseñador ha obtenido el Número Estructural SN para la sección estructural del pavimento, utilizando el gráfico o la ecuación general básica de diseño, (Figura 3.9 del Anexo 1) donde se involucraron los parámetros anteriormente descritos (tránsito, R, S_o , M_R , ΔPSI), se requiere ahora determinar una sección multicapa que en conjunto provea de suficiente capacidad de soporte equivalente al número estructural de diseño original. La siguiente ecuación puede utilizarse para obtener los espesores de cada capa, para la superficie de rodamiento o carpeta, base y subbase, haciéndose notar que el actual método de AASHTO, versión 1993, ya involucra coeficientes de drenaje particulares para la base y subbase.

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2m_2 + a_3D_3m_3 \quad (4.4)$$

Dónde:

a_1 , a_2 y a_3 = Coeficientes de capa representativos de carpeta, base y subbase respectivamente.

D_1 , D_2 y D_3 = Espesor de la carpeta, base y subbase respectivamente, en pulgadas.

m_2 y m_3 = Coeficientes de drenaje para base y subbase, respectivamente.

Para la obtención de los coeficientes de capa a_1 , a_2 y a_3 deberán utilizarse las Figuras 3.10 a 3.14 del Anexo 1, en donde se representan valores de correlaciones hasta de cinco diferentes pruebas de laboratorio: Módulo Elástico, Texas Triaxial, R - valor, VRS y Estabilidad Marshall.

Para la obtención de los coeficientes de drenaje, m_2 y m_3 , correspondientes a las capas de base y subbase respectivamente, el método actual de AASHTO se basa en la capacidad del drenaje para remover la humedad interna del pavimento, definiendo lo siguiente:



Tabla 3.22. CAPACIDAD DEL DRENAJE PARA REMOVER LA HUMEDAD.

CALIDAD DEL DRENAJE:	AGUA REMOVIDA EN:
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Malo	agua no drena

En la Tabla 3.23 se presentan los valores recomendados para m_2 y m_3 (bases y subbases granulares sin estabilizar) en función de la calidad del drenaje y el porcentaje del tiempo a lo largo de un año, en el cual la estructura del pavimento pueda estar expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.

Tabla 3.23.- VALORES m_i RECOMENDADOS PARA MODIFICAR LOS COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA DE BASES Y SUBBASES SIN TRATAMIENTO, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Calidad del Drenaje	Porcentaje de Tiempo al cual está Expuesta la Estructura del Pavimento a Niveles de Humedad Próxima a la Saturación			
	Menor del 1%	1 - 5%	5 - 25%	Mayor del 25%
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Bueno	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
Regular	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Pobre	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy Pobre	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

Para capas estabilizadas con cemento o asfalto y para la superficie de rodamiento elaborada con concreto asfáltico, el método no considera un posible efecto por el drenaje, por lo que en la ecuación de diseño sólo intervienen valores de m_2 y m_3 y no se asigna valor para m_1 correspondiente a la carpeta.



Para el cálculo de los espesores D1, D2 y D3 (en pulgadas), el método sugiere respetar los siguientes valores mínimos, en función del tránsito en ejes equivalentes sencillos acumulados:

Tabla 3.24. ESPESORES MÍNIMOS, EN PULGADAS, EN FUNCIÓN DE LOS EJES EQUIVALENTES.

TRÁNSITO (ESAL's) EN EJES EQUIVALENTES	CARPETAS DE CONCRETO ASFÁLTICO	BASES GRANULARES
Menor de 50,000	1.0 ó T.S.	4.0
50,001 - 150,000	2.0	4.0
150,001 - 500,000	2.5	4.0
500,001 - 2'000,000	3.0	6.0
2'000,001 - 7'000,000	3.5	6.0
Mayor de 7'000,000	4.0	6.0

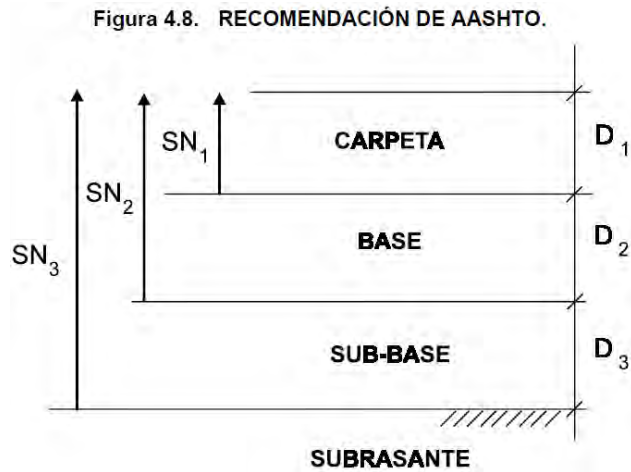
T.S. = Tratamiento superficial con sellos.

3.5.8 ANÁLISIS DEL DISEÑO FINAL CON SISTEMA MULTICAPA.

Deberá reconocerse que para pavimentos flexibles, la estructura es un sistema de varias capas y por ello deberá diseñarse de acuerdo a ello. Como ya se describió al principio del método, el “número estructural SN” sobre la capa subrasante o cuerpo del terraplén es lo primero a calcularse. De la misma manera deberá obtenerse el número estructural requerido sobre las capas de la subbase y base, utilizando los valores de resistencia aplicables para cada uno. Trabajando con las diferencias entre los números estructurales que se requieren sobre cada capa, el espesor máximo permitido de cualquier capa puede ser calculado. Por ejemplo, el número estructural máximo permitido para material de la capa de subbase, debe ser igual al número estructural requerido sobre la subbase restado del SN requerido sobre la subrasante.



El Método AASHTO recomienda el empleo de la siguiente figura y ecuaciones:



$$D^*_1 \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN^*_1 = a_1 D_1 \geq SN_1$$

$$D^*_2 \geq \frac{SN_2 - SN^*_1}{a_2 m_2}$$

$$SN^*_1 + SN^*_2 \geq SN_2$$

$$D^*_3 \geq \frac{SN_3 - (SN^*_1 + SN^*_2)}{a_3 m_3}$$

NOTAS:

- 1) a, D, m, y SN corresponden a valores mínimos requeridos.
- 2) D* y SN* representan los valores finales de diseño.

Con todo lo anterior queda configurada la sección estructural de proyecto para pavimento flexible.



3.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Ahora que se han estudiado cuatro métodos para diseñar la estructura de un pavimento flexible y de acuerdo a los requerimientos y condiciones físicas y climáticas para un proyecto ejecutivo, será el método que se utilice. Con la finalidad de obtener los resultados que se necesiten.

Cada método de diseño presentado en el capítulo parte de diferentes análisis según los datos de entrada, el procesamiento de la información se obtiene, como ya se vio de gráficas y tablas establecidas analítica y estadísticamente.

Ahora bien, si se requiere construir una carretera en alguna región específica del país, lo que debemos hacer es identificar las características del proyecto original, los factores físicos y climáticos de la zona, las solicitudes de tránsito y tener en cuenta el desempeño al que se quiere llegar. Una vez identificados estos factores, se trabaja en base al método que mejor se adapte a las necesidades del proyecto.

El objetivo del capítulo consistió en reconocer la importancia que tiene el diseño del pavimento dentro del proceso constructivo porque debido a la falta del mismo, es que se generan deterioros en la estructura del pavimento y eso ocasiona problemas para los usuarios que utilizan las carreteras.

Se concluye entonces, que dentro del proceso constructivo se debe respetar la etapa del diseño, eligiendo el método o los métodos necesarios para el proyecto. Además de tener la opción de implementar tecnologías de nueva generación como se verá en el siguiente capítulo.



CAPÍTULO 4.-
TECNOLOGÍAS APLICADAS ACTUALMENTE EN
PAVIMENTOS FLEXIBLES



4 CAPÍTULO IV.- TECNOLOGÍAS APLICADAS ACTUALMENTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

4.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

En éste capítulo se hará mención de algunas tecnologías aplicadas en la construcción de pavimentos flexibles que existen actualmente.

El objetivo de éste capítulo consiste en demostrar que existen nuevas aplicaciones tecnológicas que parten desde el diseño de un pavimento flexible hasta la implementación de productos de nueva generación utilizados durante el proceso constructivo. Tal es el caso de la utilización de asfaltos modificados o agregados pétreos con granulometrías específicas para proporcionar mayor comodidad a las carreteras. Dentro de los productos asfálticos, el mercado ofrece asfaltos celulares o espumados, que pueden tener aplicaciones como el reciclado en frío de pavimentos asfálticos y estabilización de suelos. Otra de las innovaciones durante el proceso constructivo de las carreteras es el uso de geosintéticos, de los cuales se derivan muchos productos que existen en el mercado, como el geotextil, la geomalla de fibra de vidrio, entre otros, y se utilizan para reforzar la estructura del pavimento en las diferentes capas del mismo.

Cabe resaltar que la innovación no solo consiste en utilizar nuevos productos, sino también en mejorar los diseños del pavimento, haciendo algunos ajustes al método utilizado o mejorándolo con programas de computadora (software).

De las aplicaciones mencionadas en el presente capítulo, se resaltaré la importancia de la etapa de diseño, ya que es en las pruebas y experimentación de donde surgen las nuevas tecnologías que se utilizan actualmente y que se utilizarán en el futuro, como se verá en el último capítulo de este trabajo de investigación.



4.2 EL SISTEMA DE SELLADO Y CARPETA DELGADA SUPERFICIAL ALTAMENTE ADHERIDA (CASAA).

Es una carpeta asfáltica en caliente de granulometría escalonada de alta fricción interna que provee una excelente macrotextura y se utiliza como tratamiento de mantenimiento preventivo que alarga la vida útil del pavimento. El Sistema de Sellado y Carpeta Asfáltica Superficial Altamente Adherida tiene dos objetivos principales:

- Proporcionar una superficie de rodamiento de la más alta calidad en términos de confort y seguridad para el usuario.
- Servir como tratamiento de conservación preventivo, al garantizar una impermeabilización (sellado) total de la carpeta asfáltica interior protegiendo de una degradación acelerada la totalidad de la estructura del pavimento.

El concepto CASAA consiste en usar una membrana extremadamente homogénea de emulsión de asfalto modificado con polímero, que es el elemento que garantiza la impermeabilización y la alta adherencia con la carpeta asfáltica de calidad estructural, seguida inmediatamente de una carpeta delgada de concreto asfáltico elaborado en caliente de alto nivel de servicio y durabilidad.

El procedimiento de aplicación debe asegurar la homogeneidad de la membrana asfáltica polimerizada y una inmediata aplicación del concreto asfáltico, con la finalidad de obtener los beneficios anteriormente descritos y maximizar la durabilidad del tratamiento ya que de esta forma se generaría una alta adherencia (liga) con la capa inferior del pavimento.



4.2.1 PROCESO CONSTRUCTIVO.

4.2.1.1 ESPECIFICACIONES PRELIMINARES.

No debe permitirse aplicación alguna sobre el pavimento cuya superficie esté mojada. La temperatura de la superficie del pavimento, así como la temperatura ambiental no debe ser menor a 10°C en el momento de la aplicación.

La máquina pavimentadora debe tener la capacidad de ser autopropulsada y estar especialmente diseñada y construida para aplicar el sistema CASAA. Deben tener depósito-tolva de recepción y banda transportadora para evitar segregación, tanque de almacenamiento de emulsión asfáltica, sistema medidor por volumen de la emulsión de asfalto modificado con polímero, barra esparcidora con sistema de calentamiento (de longitud variable), y placa vibrocompactadora. Este equipo debe ser capaz de rociar la membrana de emulsión de asfalto modificado con polímero, aplicando la capa de mezcla en caliente y nivelando la superficie en una misma acción y en forma sincronizada.

4.2.1.2 APLICACIÓN.

La aplicación debe realizarse desde el centro de la corona, realizando un ajuste vertical por medio de sus extensiones para alcanzar el perfil deseado en el pavimento. Si se trata de una superficie que fue previamente fresada deberá estar libre de polvo y se deberá realizar un relleno y sellado de grietas mayores a 5mm.

La membrana de emulsión de asfalto modificado con polímero sin diluir debe ser rociada por la barra del equipo a una temperatura entre 49 a 75°C, o conforme la recomendada con el proveedor del producto asfáltico. La dosificación de la membrana asfáltica sin diluir debe ser considerada en el orden de los 0.70 hasta los 1.5 lt/m². El concreto asfáltico de mezcla en caliente debe ser aplicado a una temperatura entre 140-165°C y debe ser colocado inmediatamente después de haberse aplicado la membrana de emulsión de asfalto modificado con polímero sobre toda la superficie de aplicación.



4.2.1.3 COMPACTACIÓN

Consiste en un mínimo de dos pasadas con un rodillo de tambor metálico liso con un peso mínimo de 10 Ton, antes de que la temperatura del material baje a menos de 100°C, debiéndose evitar que los equipos de compactación se estacionen sobre el concreto asfáltico recién aplicado.

La compactación debe desarrollarse inmediatamente después de la aplicación de la capa asfáltica, mediante la utilización de un compactador, el cual deberá estar equipado con un sistema de rocío por agua para prevenir la adherencia entre la mezcla recién extendida y el tambor metálico del equipo. El equipo de compactación deberá operarse en el modo estático, ya que una excesiva compactación podría causar la disgregación del material o un perfil inadecuado.

La capa asfáltica de rodamiento no debe ser abierta al tráfico si no se ha completado el proceso de compactación y si el material no se encuentra por debajo de los 85°C. La planta de mezcla en caliente deberá contar con sistema automático de dosificación de fibras y con sistema de recuperación de finos al proceso de mezclado.



FIGURA 4.1- COMPACTACIÓN DE CARPETA ASFÁLTICA (CASAA)

4.3 ASFALTO ESPUMADO Y DISEÑO DE MEZCLA

El asfalto espumado (también conocido como asfalto celular), se logra mediante un proceso, en el cual se inyecta una pequeña cantidad de agua fría (1 a 2% del peso del asfalto) y aire comprimido a una masa de asfalto caliente (160°C - 180°C), dentro de una cámara de expansión (Figura 4.3), generando espontáneamente espuma.

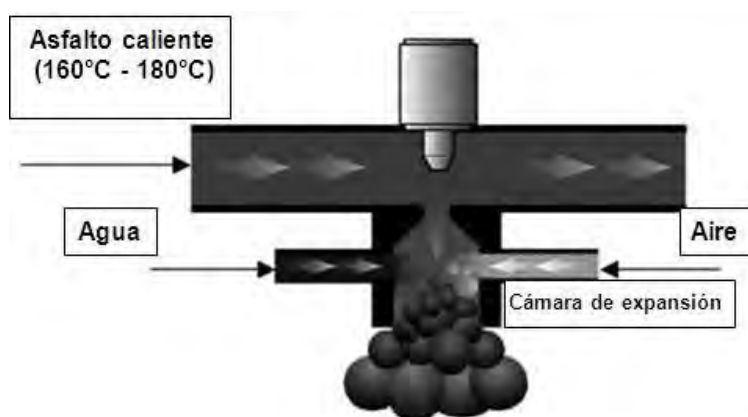


Figura 4.3. Cámara de expansión

El proceso de expansión se puede explicar de la siguiente manera: en el momento que las gotas de agua fría toman contacto con el asfalto caliente, se produce un intercambio de energía entre el asfalto y las gotas de agua, lo que eleva la temperatura del agua hasta los 100°C , esta transferencia energética genera en forma instantánea vapor y una expansión explosiva del asfalto.

Las burbujas de vapor son forzadas a introducirse en el asfalto dentro de la cámara de expansión. El asfalto junto con el vapor de agua encapsulado es liberado desde la cámara a través de una válvula (dispositivo rociador) y el vapor encapsulado se expande formando burbujas de asfalto contenidas por la tensión superficial de éste hasta alcanzar un estado de equilibrio.

Debido a la baja conductividad térmica del asfalto y del agua, las burbujas pueden mantener el equilibrio por pocos segundos (10-30 segundos). Este proceso ocurre para una gran cantidad de burbujas.

A medida que la espuma se enfría a temperatura ambiente, el vapor en las burbujas se condensa causando el colapso y la desintegración de la espuma. La desintegración de la burbuja (o colapso de la espuma) produce miles de gotitas de asfalto las cuales al unirse recuperan su volumen inicial sin alterar significativamente las propiedades reológicas originales del asfalto.

Para la producción de mezclas con asfalto espumado, el agregado debe ser incorporado mientras el asfalto se encuentre en estado de espuma. Al desintegrarse la burbuja en presencia del agregado, las gotitas de asfalto se aglutinan con las partículas más finas (especialmente con aquellas fracciones menores a 0.075 mm), produciendo una mezcla asfalto agregado fino, proceso que se denomina dispersión del asfalto.

Esto resulta en una pasta de filler y asfalto que actúa como un mortero entre las partículas gruesas.



FIGURA 4.4.- PROCESO DEL ASFALTO ESPUMADO



4.3.1 DISEÑO DE LA MEZCLA

El procedimiento básico para el diseño de mezclas con asfalto espumado se resume en los siguientes pasos:

- a) Optimización de las propiedades de la espuma
- b) Caracterización del agregado
- c) Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla
- d) Determinación del contenido óptimo de asfalto
- e) Caracterización de las propiedades mecánicas de las mezclas

a) Optimización de las propiedades de la espuma

Esta etapa tiene como objetivo determinar la temperatura del asfalto y la cantidad de agua a inyectar que optimicen tanto la Razón de Expansión como la Vida Media.

Para llevar a cabo las mediciones en laboratorio de las propiedades de la espuma, se emplea un equipo de producción de asfalto espumado, cuya principal característica es poseer una cámara de expansión, idéntica a la empleada en terreno para producir la espuma de asfalto.

b) Caracterización del agregado

Debido a la gran variedad de agregados que pueden ser mezclados con asfalto espumado, estos deben ser caracterizados considerando dos propiedades: su distribución granulométrica y el Índice de Plasticidad.

Una vez obtenida la curva granulométrica del agregado, es comparada con la clasificación mostrada en la Figura 4.5.

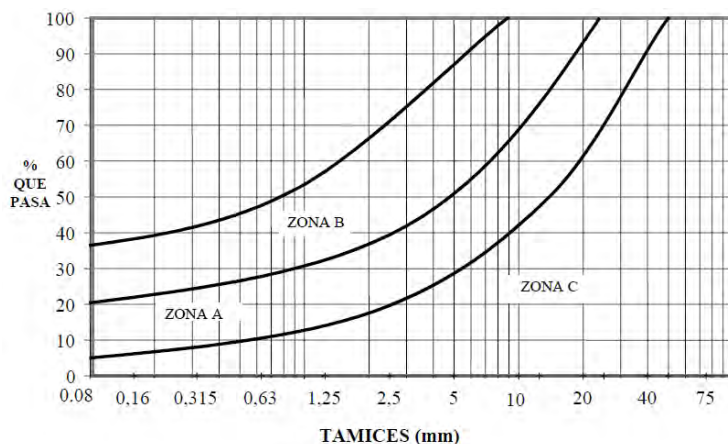


Figura 4.5. Clasificación de materiales granulares.

Si el material se encuentra en la Zona A de esta clasificación, es apropiado para ser empleado en carreteras con tráfico pesado. Los materiales de la Zona B son apropiados para tráfico liviano, pero su comportamiento puede ser mejorado mediante la adición de fracciones gruesas. Los materiales de la Zona C son deficientes en finos y no son apropiados para la estabilización a menos que su graduación sea mejorada mediante la adición de finos.

El contenido de finos del agregado, es un parámetro fundamental debido a la influencia que tiene en el proceso de dispersión del asfalto y en general debe encontrarse sobre un 5%.

El Índice de Plasticidad es un indicador de la capacidad que tienen los finos para ser mezclados con la espuma de asfalto. Dependiendo de los valores que alcance este índice se recomienda el uso de pequeñas cantidades de cemento de acuerdo con la clasificación mostrada en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1. RECOMENDACIONES PARA LA INCORPORACIÓN DE CEMENTO A LA MEZCLA CON ASFALTO ESPUMADO.

Índice de Plasticidad	Cantidad de Cemento (% en peso del agregado)
IP < 10	1 %
10 < IP < 16	1.5 %
IP > 16	3 %



c) Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla

El contenido de humedad durante el proceso de mezclado y compactación es considerado por muchos investigadores como el criterio de diseño más importante en las mezclas con asfalto espumado debido a su efecto lubricante sobre las partículas finas durante la dispersión del asfalto.

La relación Humedad - Densidad debe ser considerada en el diseño de la mezcla. Una insuficiente cantidad de agua resultará en un agregado seco y polvoriento lo que provocará que la espuma al colapsar forme grumos de asfalto y no se mezcle adecuadamente con la fracción fina del agregado. Un exceso de agua incrementará el tiempo de curado, reduciendo la resistencia de la mezcla.

Las mezclas con bajas densidades son consecuencia de bajos contenidos de humedad, lo que se traduce en una inadecuada dispersión del asfalto espumado. Para el diseño se recomienda como contenido óptimo de humedad, el 75% de la humedad óptima de compactación obtenida mediante el ensayo Proctor Modificado.

d) Determinación del contenido óptimo de asfalto

Para determinar el contenido óptimo de asfalto, deben ser confeccionadas un mínimo de 5 mezclas con distintos contenidos asfálticos (1% – 3 % de asfalto), y evaluar el comportamiento de cada una de ellas en función de la Tracción Indirecta (o tracción por compresión diametral), determinada tanto en estado seco como saturado. El contenido óptimo de asfalto es aquel que maximiza la Tracción Indirecta saturada. La Tracción Indirecta (en estado seco o saturado), se determina sobre probetas cilíndricas (100 mm de diámetro por 63.5 mm de espesor) compactadas con 75 golpes del martillo Marshall.

Antes de someter a las probetas al ensayo de Tracción Indirecta, estas son curadas durante 72 horas en un horno a 40° C. El estado saturado se logra sumergiendo las probetas en agua durante 24 horas a 25 °C.



e) Caracterización de las propiedades mecánicas de las mezclas

Las propiedades mecánicas más utilizadas para caracterizar las mezclas de asfalto espumado son: CBR, Tracción Indirecta, Módulo Resiliente, Compresión no Confinada, Estabilidad Marshall y Resistencia a la Fatiga.

Las propiedades mecánicas son susceptibles a la humedad, sin embargo existen ciertos aditivos como la cal o el cemento que reducen esta susceptibilidad, al igual que elevados contenidos de asfalto, debido principalmente a la reducción de la permeabilidad.

Las mezclas con asfalto espumado disminuyen el valor de sus propiedades mecánicas con el incremento en la temperatura, pero son menos susceptibles que las mezclas asfálticas en caliente. A temperaturas superiores a los 30 ° C, las mezclas con asfalto espumado poseen un Módulo Resiliente más alto que las mezclas asfálticas en caliente equivalentes (después de 21 días de curado a temperatura ambiente).

4.3.2 APLICACIONES DEL ASFALTO ESPUMADO

Existen principalmente dos tipos de aplicaciones para el asfalto espumado, el reciclado en frío de pavimentos asfálticos y la estabilización de suelos.

1. Reciclado en frío de pavimentos asfálticos: Consiste en la recuperación del material de un pavimento asfáltico existente, el cual es mezclado con asfalto espumado, adiciones (cemento o cal) y agregados nuevos (si es necesario) para formar una base asfáltica que será colocada en el mismo lugar o en otro distinto. La recuperación puede ejecutarse mediante un equipo fresador capaz de disgregar el material o mediante métodos convencionales donde el proceso de disgregación ocurre con posterioridad a la recuperación. En general el material recuperado está formado no sólo por concreto asfáltico disgregado, sino también por agregados aportados por la base y subbase granular existente.



-
2. Estabilización de suelos: Consiste en la estabilización de suelos de relativa baja plasticidad ($IP < 16$) con asfalto espumado en donde los suelos pueden provenir de la recuperación de áridos de un camino sin pavimentar o de nuevos pozos. Principalmente se emplean agregados recuperados cuya granulometría es mejorada por agregados nuevos (si es necesario), ya que uno de los objetivos de esta aplicación es obtener mezclas de bajo costo.

Ambas aplicaciones pueden ejecutarse mediante tecnología en sitio y en planta:

- La tecnología en sitio requiere de un equipo fresador-mezclador. Existen varios modelos y configuraciones para este tipo de equipos, pero en general todos poseen un tambor de fresado-mezclado, en el cual el material es removido desde la superficie, triturado, mezclado con el asfalto espumado y extendido. La inyección del asfalto espumado en el agregado se realiza simultáneamente a través de varias cámaras de expansión individuales. Dependiendo de los aditamentos del equipo de reciclado la mezcla puede quedar acordonada, extendida o extendida y nivelada.
- En la tecnología en planta el material es fresado, retirado y transportado hasta una planta donde se incorpora el asfalto espumado y se homogeneiza la mezcla. Luego la mezcla se transporta hasta el frente de trabajo, donde es extendida por medio de motoniveladoras o preferentemente con pavimentadoras (ya que no se requerirá de nivelación) para luego ser compactada. Los tipos de plantas utilizadas permiten su instalación en lugares inmediatos al frente de trabajo. Esto, permite reducir significativamente las distancias de transporte de materiales, además la tecnología en planta permite un mejor control de calidad de la mezcla mediante un control de su dosificación.



4.4 PAVIMENTACIÓN CON GEOSINTÉTICOS

Uno de los campos de aplicación que ha tenido un mayor grado de desarrollo en la ingeniería vial, es la utilización de los geosintéticos en obras tales como construcción y la rehabilitación de pavimentos.

El último avance mundial en tecnología de pavimentos, para el refuerzo de carpetas asfálticas, buscando minimizar los costos de mantenimiento, es el uso de geomallas de fibra de vidrio, cuya finalidad es la de reforzar las capas de la estructura del pavimento, lo cual incrementa la resistencia a la fatiga y retarda la aparición de las fisuras existentes en dicho pavimento.

4.4.1 FUNCIONES DEL GEOTEXTIL

Son intercapas usadas para prevenir o reducir el calcado de grietas, la aparición de grietas del tipo de piel de cocodrilo y los fenómenos de ahuellamiento y corrugamiento. Las dos funciones básicas que cumple el geotextil impregnado con asfalto para poder suministrar sus beneficios, son las de:

- Barrera Impermeabilizadora.
- Membrana Amortiguadora de Esfuerzos.



FIGURA 4.6.- COLOCACIÓN DE GEOTEXTIL



4.4.2 FUNCIONES DE LA GEOMALLA DE FIBRA DE VIDRIO

Su principal función consiste en aumentar la resistencia a la tracción de la capa asfáltica y de garantizar bajo una carga vertical, la distribución uniforme de los esfuerzos horizontales en una mayor superficie, lo cual se traduce a una vía sin grietas por varios años.

Las geomallas de fibra de vidrio, son geomallas flexibles que se utilizan entre capas de concreto asfáltico con el fin de controlar agrietamientos por reflexión, agrietamientos por fatiga y deformaciones plásticas, en los revestimientos de concreto asfáltico que se emplean en vías de alto y bajo tráfico, autopistas, aeropuertos, plataformas y parqueaderos entre otros.



FIGURA 4.7. COLOCACIÓN DE GEOMALLA EN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

4.4.3 PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN

Para que el desempeño del geosintético (geomalla de fibra de vidrio, geotextil de repavimentación) a utilizar en esta aplicación sea el correcto y su vida de servicio sea la esperada, deberá apegarse al siguiente proceso de instalación:



4.4.3.1 CONDICIONES Y LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE

Para garantizar que la adhesión del geosintético a la capa de rodadura vieja y a la de repavimentación sea la adecuada, deberá preverse que la superficie sobre la cual se colocarán los rollos del geosintético esté razonablemente libre de elementos tales como mugre, agua, vegetación y escombros que pudiesen entorpecer el contacto entre el ligante asfáltico y la carpeta vieja.

4.4.3.2 TRATAMIENTO DE FISURAS

Después de terminar el proceso de limpieza, todas las fisuras deberán ser sopleteadas y selladas con un material apropiado para tal fin, sin sobrepasar la cantidad por encima del nivel existente; dichas fisuras deberán recibir un tratamiento adecuado según su grado de deterioro.

En el caso de que las grietas sean originadas por fallas estructurales, el pavimento será intervenido de la manera más adecuada dependiendo del tratamiento escogido, según sea el caso.

4.4.3.3. LIGANTE ASFÁLTICO

El material que se utilizará para garantizar una adecuada adhesión del geosintético a la base granular, base estabilizada, losas de concreto o a la mezcla asfáltica existente, y a la capa superior (capa de refuerzo, o de mantenimiento), podrá ser un cemento asfáltico de penetración 60-70 mm/10, emulsión catiónica de rompimiento rápido tipo 1 o una emulsión catiónica de rompimiento rápido tipo 1 modificada con polímeros de tal forma que se satisfaga la cantidad de asfalto mínima requerida como se verá más adelante.



En el geotextil se debe garantizar la saturación del mismo para generar la membrana viscoelastoplástica, mientras que en la geomalla solo se necesitará garantizar la adhesión al sistema.

El geosintético se podrá colocar solo después del correspondiente rompimiento de la emulsión en caso de que esa sea la elección a utilizar como ligante. Para esta aplicación no se podrán utilizar los asfaltos diluidos que contienen solventes.

4.4.3.4 TEMPERATURAS DE TRABAJO

Las temperaturas del camión irrigador con cemento asfáltico no deben exceder los 150°C cuando se trabaja con asfaltos normalizados; ésta temperatura puede ser superada cuando se está trabajando con asfaltos modificados. Los patrones de riego con emulsiones asfálticas son mejorados con calentamiento. Es deseable un rango de temperaturas entre 55°C y 70°C. No debe excederse una temperatura de 70°C, puesto que a partir de esta puede romperse la emulsión.

Si se trabaja con emulsiones deberá esperarse hasta que rompa y que el agua se evapore para proceder a colocar el geosintético que se esté trabajando.

La temperatura de la superficie de la carpeta asfáltica sobre la cual se instalará la geomalla de fibra de vidrio debe estar entre 5°C y 60 °C.

4.4.3.5 INSTALACIÓN DEL GEOSINTÉTICO

La instalación del rollo del geosintético puede ser realizado manual o mecánicamente, existiendo equipos patentados para la colocación de los rollos.

En nuestro medio la instalación se ha venido haciendo manualmente, siendo necesaria una cuadrilla de tres personas (dos manteniendo la alineación del rollo y desenrollándolo, y otra persona cepillando sobre el geosintético, eliminando al máximo las arrugas), sin necesidad de ser mano de obra capacitada ni especializada. Para esta aplicación, si se utiliza geotextil, se debe instalar siempre la parte sin termofundir en contacto directo con el ligante, sin arrugas.

Para facilitar un mayor contacto (adherencia) del geosintético con el ligante y con la capa antigua y eliminar en mayor proporción las arrugas del mismo, se podrán utilizar equipos mecánicos como es el caso de un compactador de llantas en una pasada directamente sobre el geosintético transitando a bajas velocidades. No es necesario realizar la sujeción del geosintético a la capa vieja mediante clavos o puntillas, solo se permite utilizar puntillas al inicio del rollo de la geomalla de fibra de vidrio.



FIGURA 4.8.- INSTALACIÓN DEL GEOSINTÉTICO

4.5 PAVIMENTOS TIPO STONE MASTIC ASPHALT (SMA)

El Stone Mastic Asphalt (SMA) está caracterizado por su estructura de piedra en piedra. El SMA utiliza una proporción alta de piedras o agregados más grandes que tienen contacto uno con el otro. Este esqueleto de rocas más grandes resiste cargas pesadas transmitiéndolas a las capas subsecuentes. Si la estructura del pavimento es suficientemente fuerte, entonces el SMA resistirá las cargas pesadas efectivamente.

Es importante que el material de agregado solo consista de piedras grandes (en la estructura) y finas para lograr un mastic efectivo. Los tamaños de agregado intermedios no son incluidos, ya que mantienen al agregado más grande separado y reduce la resistencia del SMA.

El desempeño del SMA es dependiente de la graduación y las proporciones de los materiales (definidos por la especificación aceptada), el proceso de mezclado, la planta y el proceso de compactación. Todos los aspectos deben estar cercanamente monitoreados sí se quiere que la superficie del SMA tenga una larga vida.

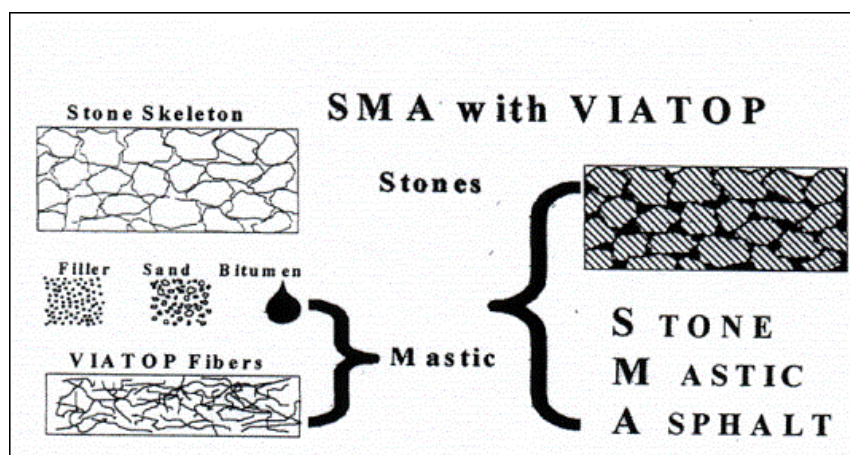


FIGURA 4.9.- ESTRUCTURA DE UN SMA.



4.5.1 TENDIDO DEL SMA

4.5.1.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS

Para lograr una correcta colocación y compactación, debe evitarse el tendido de mezclas SMA en clima frío o inclemente. No debe colocarse el SMA a temperaturas de pavimento por debajo de los 10°C, particularmente donde se utilizan los ligantes modificados con polímero. La decisión de tender el SMA también dependerá de las condiciones de viento, temperatura del pavimento, espesor colocado, el equipo y los procedimientos a usarse al tender y compactar la mezcla.

4.5.1.2 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

La superficie es generalmente la misma que para las mezclas de asfalto convencionales. La pérdida de forma o depresiones en los pavimentos existentes deben rellenarse usando una capa regulatoria y reparar adecuadamente las áreas afligidas. El SMA ha mostrado un desempeño superior, no se puede esperar que se comporte como se desea cuando se usa para cubrir los problemas del pavimento existente. Todas las superficies deben recubrirse antes de tender el SMA, utilizando materiales y rangos de aplicación apropiados a la construcción de asfalto convencional.

4.5.1.3 EXTENDIDO

Debe seguirse la práctica normal. Se debe prestar atención a tales factores como mantener una velocidad constante de la pavimentación y un flujo constante de material a través de la pavimentadora, de modo que se mantenga una cabeza uniforme de material adelante del solado con bandas transportadoras y barrenos operando continuamente cerca.



4.5.1.4 COMPACTACIÓN

Los procedimientos requieren alguna variación en comparación a los utilizados en las mezclas convencionales. El método preferido de compactación de SMA es con rodillos pesados y no vibratorios de acero. Como muy pocos contratistas tienen tal equipo de compactación, es por lo general necesario utilizar rodillos de acero vibratorios.

En tales casos, el proceso de rodado debe hacerse en una o dos fases en modo no vibratorio antes de usar una o dos pasadas vibrantes. Se debe tener cuidado de evitar el escurrimiento del ligante a la superficie del SMA por vibración excesiva, y evitar fracturar al agregado grueso. Generalmente, debe usarse solo vibración de baja frecuencia. Los procedimientos de compactación deben monitorearse y modificarse si se requiere.

El rodado con rodillo debe empezar inmediatamente después del pavimentador en todo momento. Si la operación de rodado se atrasa, el tendido debe disminuir su velocidad hasta que los rodillos alcancen al pavimentador.

4.5.1.5 APERTURA AL TRÁFICO

Las superficies de SMA en México no deben abrirse al tráfico hasta que la temperatura superficial disminuya alrededor de 40°C para prevenir el escurrimiento del ligante a la superficie por el tráfico inicial.

La resistencia inicial al deslizamiento del SMA puede ser relativamente baja hasta que la película del ligante sea desgastada por el tráfico. Una técnica que se ha usado en algunos países es esparcir la superficie ligeramente con arena gruesa o agregado triturado de tamaño pequeño (p. ej. 5 mm), para ayudar a liberar el ligante de la superficie en situaciones donde la resistencia al deslizamiento es de primera importancia, lo cual sería conveniente aplicar en México. Alternativamente, las restricciones de velocidad pueden aplicarse por un periodo corto de tiempo.



4.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

Como se pudo observar, en cada uno de los ejemplos ilustrados en este capítulo la etapa de diseño es una de las más importantes. Al método utilizado para cada tipo de pavimento, se le agrega la tecnología utilizada, esto es, para todo pavimento diseñado convencionalmente se le adaptan los productos que alterarán su estructura en pro de ofrecer una mejor calidad y buen desempeño, ya sea que se utilicen asfaltos modificados, polímeros, mezclas bituminosas, o en los agregados, utilizando materiales pétreos de distintas características físicas y de resistencia determinadas en las gráficas granulométricas que demuestran la efectividad del agregado.

No se sabe con certeza si en México se aplican estas tecnologías respetando los diseños planteados. Dadas las condiciones del proceso constructivo, es muy difícil saber si existe una supervisión que vigile rigurosamente el proyecto de una carretera desde sus inicios hasta el final. Y puede ser por esa razón que las carreteras del país sufren constantemente de fallas en su carpeta de rodamiento, o sus capas de la subestructura, esto debido al incorrecto control de calidad, lo que genera posteriormente que se realicen mantenimientos costosos. Sin embargo, es una ventaja saber que es posible aplicar nuevos productos a al diseño de los pavimentos flexibles, que éstos son una realidad y que siguen surgiendo nuevas tecnologías que con el paso del tiempo serán utilizados en nuestro país.

Hemos llegado a los tiempos parecidos al inicio de nuestra historia en cuanto a infraestructura se refiere, como ya lo vimos en el primer capítulo, las necesidades humanas eran la causa de la creación de nuevas mejoras en la vida, como la comunicación a través de caminos y carreteras. Actualmente, México cuenta con una extensa red de carreteras que comunican a todo el país, pero cada vez más se toma conciencia del impacto ambiental. No solo en México sino en todo el mundo y es allí en donde surge la importancia de éste capítulo.



**CAPÍTULO 5.-
EL FUTURO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES
EN MÉXICO**



5 CAPÍTULO V.- EL FUTURO DE LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES EN MÉXICO

5.1 INTRODUCCIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se mostrarán las nuevas tendencias en el diseño y construcción de los pavimentos alrededor del mundo utilizando tecnologías de última generación que servirán para reafirmar la utilidad de un pavimento flexible. Algunos de los proyectos que se describirán en este capítulo ya son aplicados en algunos países Europeos. De ahí la importancia de este capítulo, que consiste en saber si algún proyecto pueden ser implementado en nuestro país.

Resultará de interés para el lector conocer estas tecnologías e innovaciones a los pavimentos flexibles en las que los países desarrollados están trabajando, aprovechando los recursos que nos ofrece la naturaleza y lo más importante, cuidando el medio ambiente. Porque se hará una descripción de las características de cada propuesta y los beneficios que se obtendrán en caso de ser utilizados en las ciudades del mundo. También se describirá la forma en que pueden mejorar la vida cotidiana del ser humano, buscando como resultado hacerla más eficiente y productiva. Y lo más sorprendente, implementar dispositivos electrónicos dentro de la misma estructura del pavimento flexible que servirán como antenas de emisión y recepción de señales inalámbricas de internet a través de la cual, el mundo entero estará conectado de forma permanente, eficiente y sobretodo, gratuita.

En las conclusiones se sabrá si es posible o no, la implementación de estas tecnologías en México. Y en cuanto tiempo serán una realidad. Cuáles son las posibilidades de que en nuestro país se aprovechen de mejor manera los recursos naturales no solo en infraestructura eléctrica, en la cual se ha invertido una importante cantidad de recursos económicos en la construcción de presas hidroeléctricas, estaciones eólicas, etc., todas con el objetivo de transformar la electricidad y aprovecharla para el bien de la sociedad.



5.2 PAVIMENTOS SOSTENIBLES

La consecución de los objetivos medioambientales de reducción del consumo de combustibles fósiles implica el desarrollo de nuevas formas de aprovechamiento de las energías renovables, y desde el punto de vista de la eficiencia energética, el desarrollo de tecnologías de ahorro de energía. La línea de investigación en pavimentos asfálticos sostenibles (PAS), perteneciente al proyecto FENIX, pretende hacer frente a este reto mediante el desarrollo de un sistema innovador capaz de captar parte de la energía procedente de la irradiación solar a través de un pavimento asfáltico y almacenarla en la subbase de un firme permeable empleado como sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS). Esta energía, totalmente renovable y limpia, permitirá climatizar edificios durante todo el año y evitar la aparición de hielo en las carreteras, entre otras aplicaciones.

El origen de esta técnica se basa en el calentamiento que la superficie de los pavimentos sufre al estar sometida a la radiación solar. Si además se trata de pavimentos flexibles, con su característico color negro, este puede llegar a adquirir temperaturas cercanas a los 70 °C en días de máxima irradiación. Esto, unido a la gran cantidad de asfalto utilizado en las áreas urbanizadas, da idea de la potencialidad de este elemento como fuente de energía.

En cualquier caso, el primer paso para aprovechar esta energía es su recolección. De nada sirve la gran cantidad de energía absorbida por el asfalto si no es posible retenerla.

Actualmente ya existen algunos sistemas basados en la idea de utilizar el pavimento para absorber el calor a modo de gran panel termosolar, de almacenar ese calor en un lugar adecuado y de aprovecharlo. Empresas y centros de investigación de países como Japón, Holanda o Gran Bretaña han investigado y desarrollado sistemas de este tipo a lo largo de los últimos años. Sirvan los



siguientes antecedentes para demostrarlo, así como para colocar al sistema PAS en el contexto del avance de estas tecnologías.

A finales de los años setenta, en Estados Unidos, una patente con título “Paving and solar energy system” define ya un método para calentar el agua de una piscina haciendo circular este a través de unos tubos que pasan bajo un pavimento expuesto al sol.

En la década de los noventa, el número de instalaciones de bomba de calor geotérmica que permitían fundir el hielo instalado sobre pavimentos (aceras y carreteras) fue aumentando en países como Suiza, Alemania o Japón. Desde 1994, la planta piloto SERSO (figura 5.1), ubicada en Suiza, previene la formación de hielo en un puente de autopista.

Este sistema capta el calor absorbido por el pavimento en verano mediante unas tuberías de metal embebidas en él y lo almacena en tubos taladrados en la montaña a una cierta profundidad. Durante el invierno, ese calor mantiene la temperatura del puente por encima del punto de congelación.

En Japón, el sistema denominado GAIA (figura 5.2) funciona con éxito en la ciudad de Ninohe desde 1995. Esta instalación está compuesta por unas tuberías embebidas en el pavimento que captan parte de la energía solar absorbida por este, transportándolo a un intercambiador de calor coaxial enterrado en los alrededores donde se almacena. En invierno, esta energía calorífica pasa por una bomba de calor y se hace circular a través de las tuberías situadas bajo el pavimento evitando su congelación.

En otros países como Suecia, la circulación de agua bajo las aceras para evitar su congelación ha sido un sistema utilizado con éxito durante los últimos treinta años.

En Holanda la investigación llevada a cabo por empresas y universidades ha sido muy amplia.

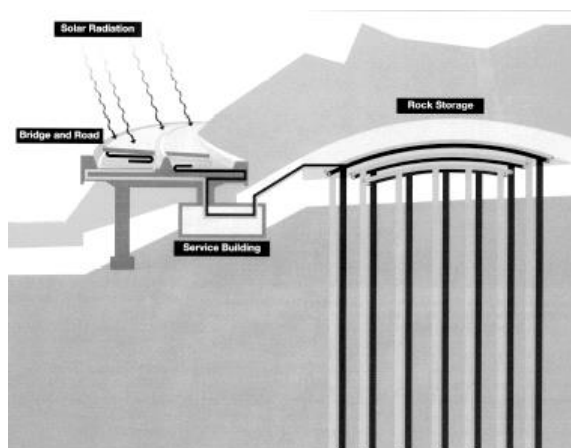


FIGURA 5.1. SISTEMA SERSO (SUIZA)

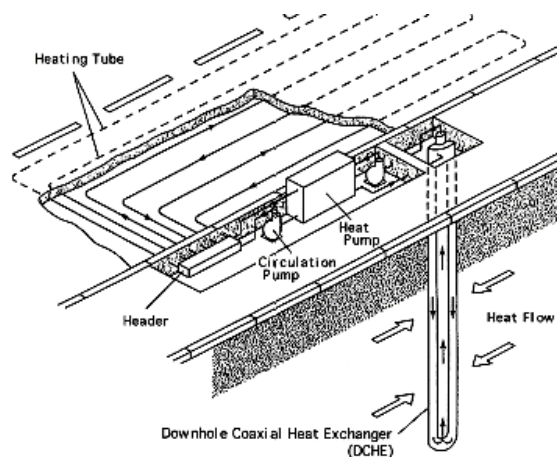


FIGURA 5.2. SISTEMA GAIA (JAPÓN)

Cabe destacar en primer lugar el estudio llevado a cabo por Van Bijsterveld, en el que se analiza la influencia del sistema en la distribución de temperaturas a través del asfalto y el efecto de los tubos y de dicha distribución en su durabilidad. Profundidad de los tubos, distancia entre ellos o caudal del fluido a través de ellos son algunos de los parámetros analizados en el estudio térmico y estructural llevado a cabo a través de ensayos de campo, de laboratorio y de la creación de modelos numéricos.

De este trabajo nacen los colectores asfálticos denominados “Road Energy System (RES)” (Figura 5.3). Este sistema, desarrollado entre los años 1997 y 2001, consiste en una capa asfáltica reforzada mediante una parrilla (grid) y unos tubos para la conducción del agua. En verano, un caudal determinado de agua fría es bombeada desde un acuífero a través de los tubos embebidos en el pavimento; debido a la radiación del sol el agua se calienta, llegando la energía calorífica a otro punto del acuífero, donde se almacena.

En invierno el sistema opera en sentido contrario extrayendo calor del acuífero.

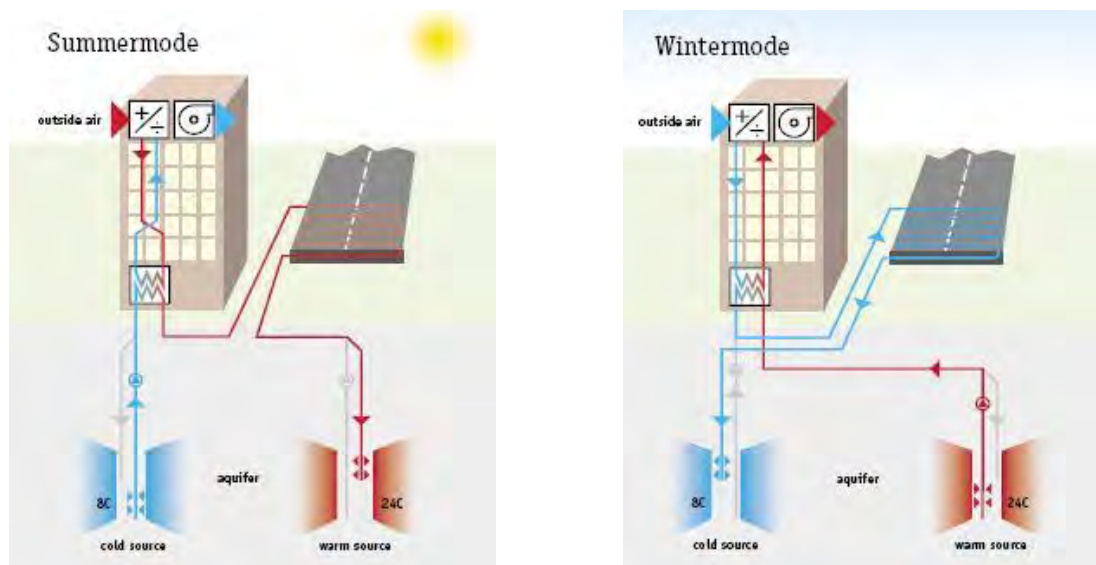


FIGURA 5.3. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO EN VERANO (IZDA.) E INVIERNO (DCHA.) DEL COLECTOR ASFÁLTICO RES (FUENTE: OOMS AVENHORN)

Por su parte, en el Reino Unido, la evolución de estos sistemas ha sido muy pareja a la de Holanda, sobre todo en los últimos años. Por un lado el progreso más importante en este campo ha sido el desarrollo de la tecnología denominada “Interseasonal Heat Transfer”. Este sistema es capaz de captar energía calorífica del sol en verano mediante el uso de una superficie apta para ello, como el asfalto, y almacenarlo en el terreno para calentar edificios en invierno. De manera contraria, este sistema puede utilizarse para refrigerar los edificios en verano.

5.2.1 ELEMENTOS Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Los elementos que componen el sistema PAS (figura 5.4) son: el colector asfáltico captador de la energía y la subbase de un pavimento poroso que hace de depósito de almacenamiento y regulación de la energía captada. Será necesaria, además, la conexión del sistema a una bomba de calor, cuya función es potenciar el efecto de la energía almacenada.

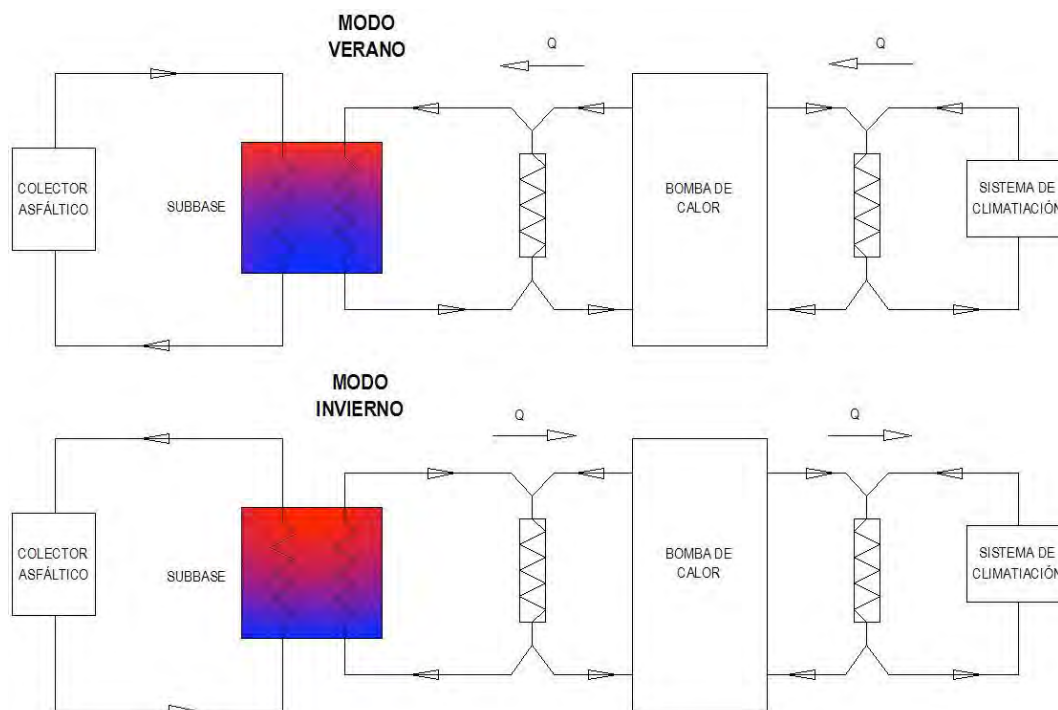


Figura 5.4. Esquema de funcionamiento del sistema PAS

El colector asfáltico está formado, a su vez, por la mezcla bituminosa que hace las veces de capa de rodadura y la red de tuberías por las que fluye el líquido encargado de transportar el calor desde la superficie asfáltica hacia el lugar donde será almacenado. La subbase estará compuesta de agua y grava con un intercambiador de calor situado en el fondo para la extracción y deposición de calor en este medio de almacenamiento. Finalmente, la bomba de calor es la responsable de amplificar la energía almacenada proporcionando así calefacción en invierno y refrigeración en verano al edificio o edificios objetivo.

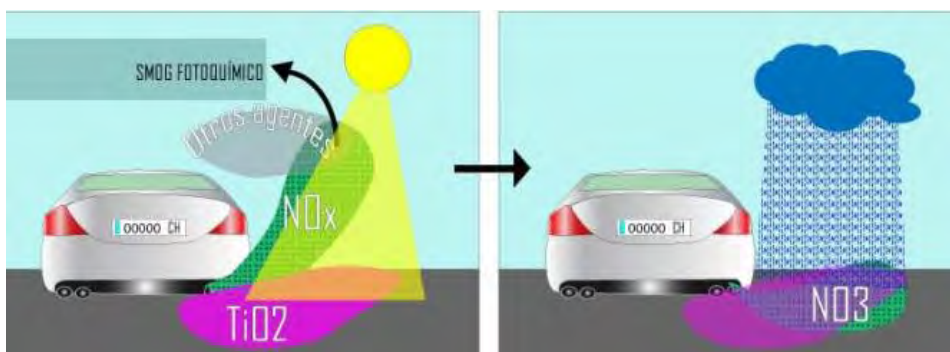


5.3 NANOTECNOLOGÍA EN PAVIMENTOS

La necesidad de un ambiente más limpio y de una mayor calidad de vida lleva a pensar en un uso ecocompatible de la luz del sol. La fotoquímica aplicada a los materiales de construcción y obra civil en carretera puede ser una solución interesante para reducir la contaminación ambiental mediante el uso de compuestos que eliminen contaminantes.

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) son capaces de degradar contaminantes a sustancias inocuas para el medio ambiente, por lo que constituyen uno de los recursos tecnológicos futuros para el tratamiento de emisiones gaseosas contaminadas. En este contexto, el dióxido de titanio (TiO_2) resulta ser interesante para ser explotado en las reacciones químicas inducidas con luz. Es el semiconductor más utilizado para aplicaciones medioambientales, por diversos motivos. En primer lugar, muchos compuestos orgánicos pueden ser oxidados fotocatalíticamente por el TiO_2 . Otros motivos para la gran utilización del TiO_2 es su estabilidad química frente a los ácidos y a las bases fuertes, su estabilidad bajo irradiación, es químicamente inocuo y económico. En fase gas, el comportamiento fotocatalítico del TiO_2 es ligeramente mejor que el ZnO bajo radiación UV y muestra una vida media superior.

Concluyendo, El TiO_2 empleado como catalizador, es un producto limpio, fotoestable y sin repercusión negativa sobre el Medio Ambiente. La estructura cristalina del TiO_2 que presenta mayor actividad fotocatalítica es la anatasa, que es la utilizada de manera habitual para aplicaciones de descontaminación ambiental. Por lo tanto, materiales nanoestructurados avanzados de TiO_2 con estructura cristalina de anatasa pueden ser utilizados en aplicaciones en procesos de oxidación avanzada.



REACCIÓN DEL NO_x AL ENTRAR EN CONTACTO CON EL TiO₂

En este sentido, los materiales con porosidad dual meso- y macroporosa pueden presentar numerosas ventajas. Estos materiales pueden poseer simultáneamente elevados volúmenes de poro (superiores a 10 cm³/g) y altas superficies específicas (superiores a 130 m²/g). Los macroporos proporcionan altos volúmenes de poro y los mesoporos elevadas superficies específicas. Se han sintetizado materiales de TiO₂ anatasa con estas propiedades duales mediante diferentes técnicas. Los materiales obtenidos poseen macroporos de tamaños superiores a 500 nm y mesoporos, de tamaños inferiores a 10 nm. Respecto a la estructura cristalina, se ha confirmado que es anatasa mediante espectroscopia Raman y difracción de rayos X. Las figuras 5.5 y 5.6 muestran ejemplos de los materiales obtenidos, observados por microscopía electrónica de barrido (SEM).

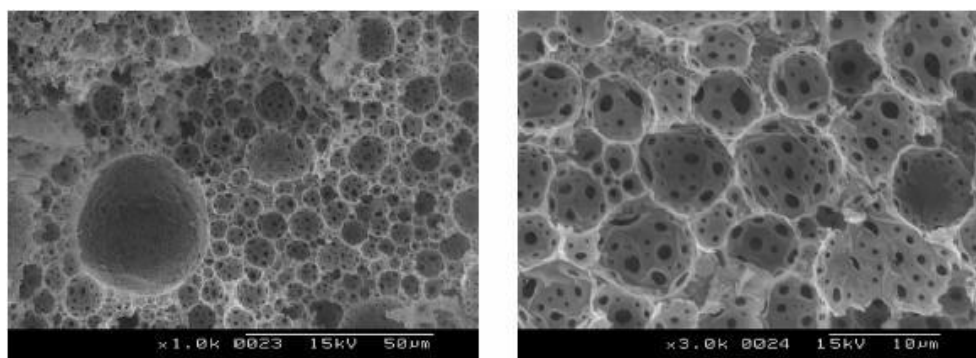


Figura 5.5: Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de espumas de poliestireno macroporosas, sintetizadas a partir de emulsiones altamente concentradas.

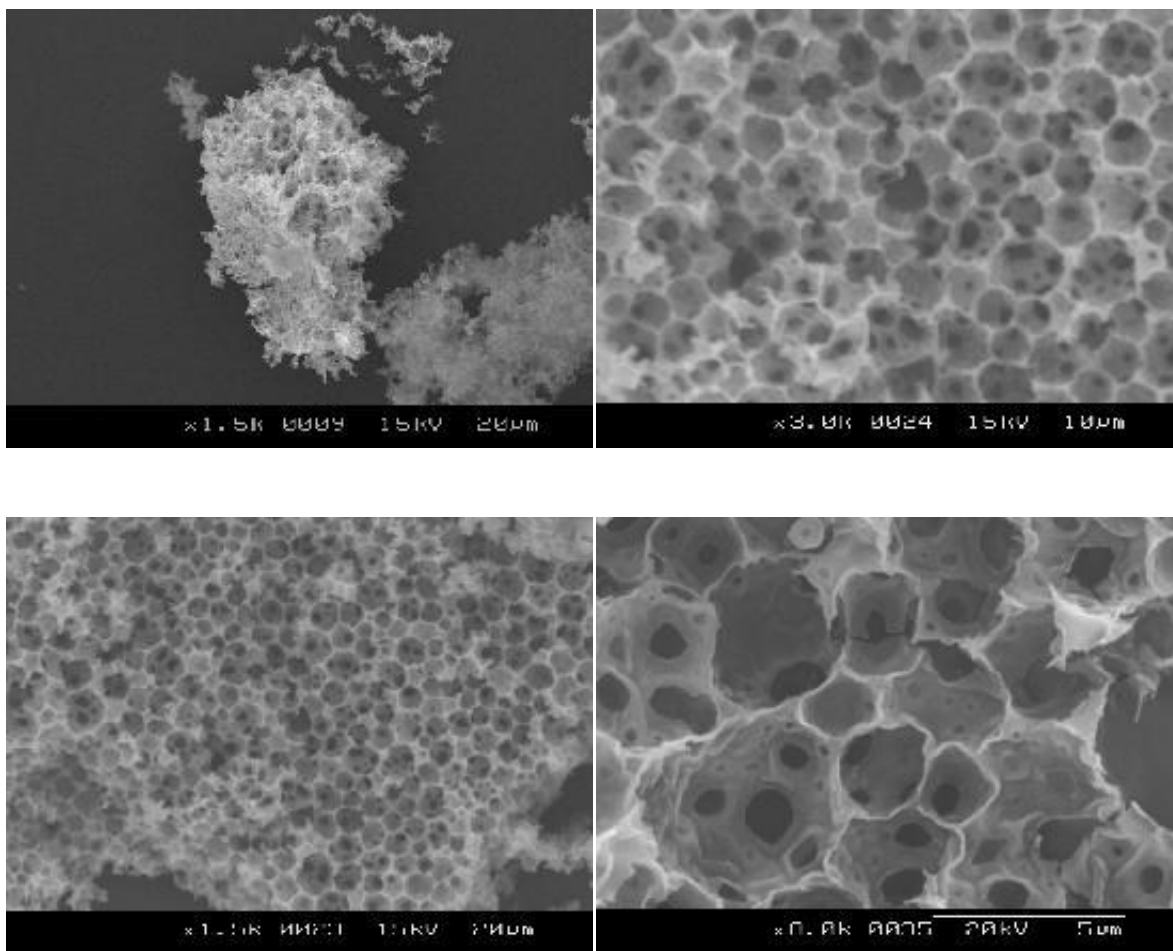


Figura 5.6: Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de TiO₂.

Los sprays fotocatalíticos son la nueva gama de los tratamientos fotocatalíticos anticontaminación basados en las propiedades del dióxido de titanio. Su aplicación sobre los pavimentos de calles y carreteras permite reducir la contaminación atmosférica de forma consistente y duradera en el tiempo.

El spray penetra en la mezcla bituminosa, permitiendo conservar prácticamente inalteradas las características superficiales de la capa de rodadura, como la adherencia neumático-pavimento, el color y eventuales características específicas, como la capacidad drenante o fonoreductora.

El dióxido de Titanio permite, mediante procesos de fotocatalización, la reducción de altas concentraciones de NOx, cuando estos se aplican sobre superficies cercanas al foco de contaminación, como las carpetas de rodamiento de las calles urbanas. El proceso de fotocátalisis y reducción de los NOx se describe en la figura 5.7.

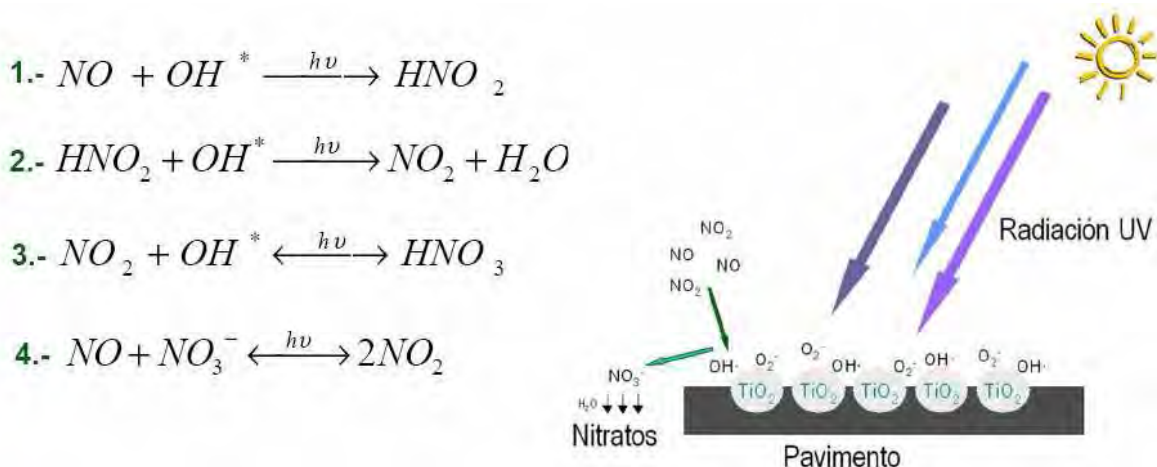


Fig. 5.7 - Mecanismo de Reacción y Degradación de los óxidos de nitrógeno en presencia del fotocatalizador TiO₂.

El dióxido de titanio, aplicado directamente sobre la superficie de calles y aceras de la ciudades más contaminadas, puede, mediante el proceso de fotocátalisis descrito anteriormente, ayudar a reducir las concentraciones de óxidos de nitrógeno presentes en el aire que respiramos, muy a menudo superiores a los valores límites impuestos por ley.

Para evaluar el comportamiento de este tipo de pavimentos descontaminantes, es necesario realizar, en primer lugar un exhaustivo control de calidad en origen, y posteriormente, en las fases de puesta en obra y explotación, un control de su eficiencia fotocatalítica, con objeto de verificar su comportamiento a largo plazo, en términos de durabilidad.



5.3.1 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS

En el campo de los pavimentos fotocatalíticos, entendiendo como tales aquellos que están destinados exclusivamente al tráfico rodado, se han desarrollado en los últimos años las siguientes tecnologías y aplicaciones:

- Capas de rodadura, a partir del empleo de mezclas bituminosas drenantes como soporte y percolación de lechadas especiales.
- Empleo de sprays sobre superficies de rodadura existentes

La primera es la técnica más habitual empleada y más conocida, que consiste en la percolación de una lechada descontaminante especial sobre una mezcla bituminosa abierta. Esta tipología de pavimentos se lleva a cabo en dos fases. En una primera fase, se coloca una mezcla bituminosa drenante convencional, de unos cuatro centímetros de espesor, con un volumen de huecos comprendido entre el 20 y el 25%. Posteriormente, y en una segunda fase, se percola sobre ella una lechada especial, a partir de dióxido de titanio, cemento, agua, carga mineral y fibras, con objeto de rellenar los huecos de la mezcla bituminosa.

Empleo de sprays sobre superficies de rodadura existentes. Los pavimentos existentes una vez pulverizados con spray, a partir de compuestos fotocatalíticos, no requieren ninguna modificación en la estructura del firme.

Esta tecnología es muy versátil ya que permite la aplicación del producto fotocatalítico directamente en el pavimento existente y sobre cualquier otra superficie, al margen de la tipología de la capa de rodadura.

El tratamiento consiste en una base inorgánica a la que se añade el TiO_2 (dióxido de titanio) y luego se pulveriza sobre las superficies, como se puede apreciar en la figura 5.8.

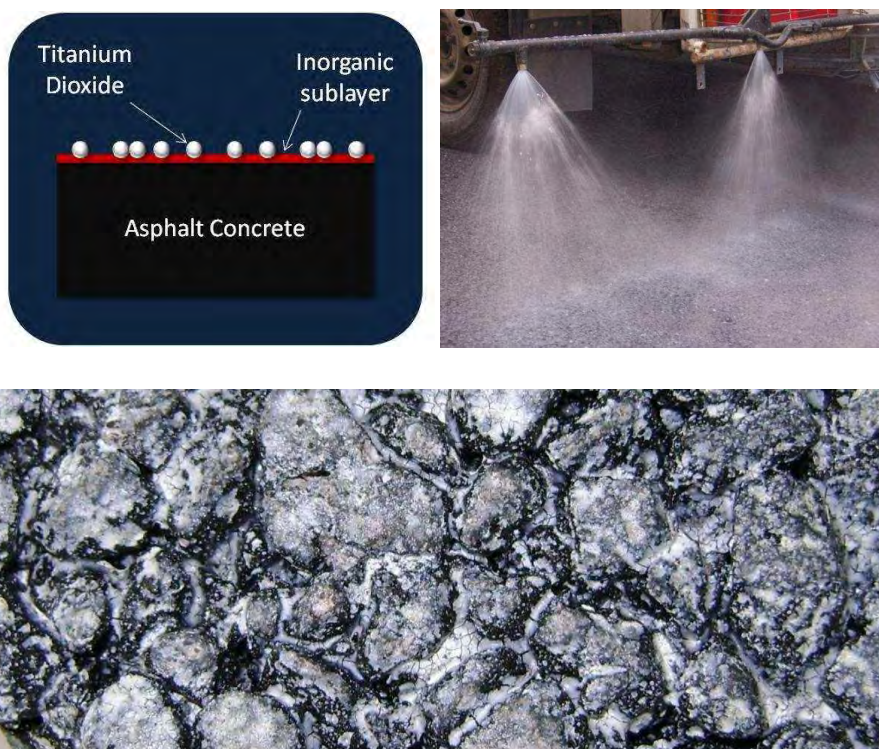


Figura 5.8 - Descripción y ejecución de técnica de pulverización sobre rodadura existente y estado final de la misma después de la aplicación.

Ese tratamiento va a trabajar directamente contra la principal fuente de contaminación urbana, es decir las emisiones de los vehículos a motor convencionales “ricas” en NO y NO_2 . El monóxido de nitrógeno es una molécula altamente inestable en el aire ya que se oxida rápidamente en presencia de oxígeno convirtiéndose en dióxido de nitrógeno.

Por tanto una importante reducción de NO conlleva una reducción de NO_2 , que al final es el indicador de calidad del aire mayormente observado.

5.4 PAVIMENTOS INTELIGENTES

El control en tiempo real de los pavimentos asfálticos, con objeto de conocer su comportamiento bajo la acción de las cargas del tráfico que lo solicitan y poder determinar con mayor exactitud su evolución en el tiempo y su vida remanente, es muy útil para la gestión de la conservación y el mantenimiento de los mismos.

Instalar un sistema de monitoreo en el firme correctamente, durante la fase de construcción, es una tarea que requiere mucha dedicación, pues hay que tener en cuenta que no existe mucha experiencia en este sentido, por una parte, y por otra, la alta agresividad a las que se ven sometidos los sistemas de control embebidos en el firme durante la ejecución, como las altas temperaturas del aglomerado o las elevadas tensiones que se generan en la fase compactación de cada capa de mezcla bituminosa.

Los sistemas de control comúnmente más utilizados son los ASG (Asphalt Strain Gages) con barras tipo H, o los sistemas con sensores embebidos en el asfalto (Comunicación 24 ASEFMA 2010). Los sistemas de barras tipo H suelen dañarse en un porcentaje aproximado del 50% durante la fase de construcción del pavimento, mientras que el sistema de sensores embebidos en el firme sigue en fase de experimentación y no se conoce ni su durabilidad ni su precisión.

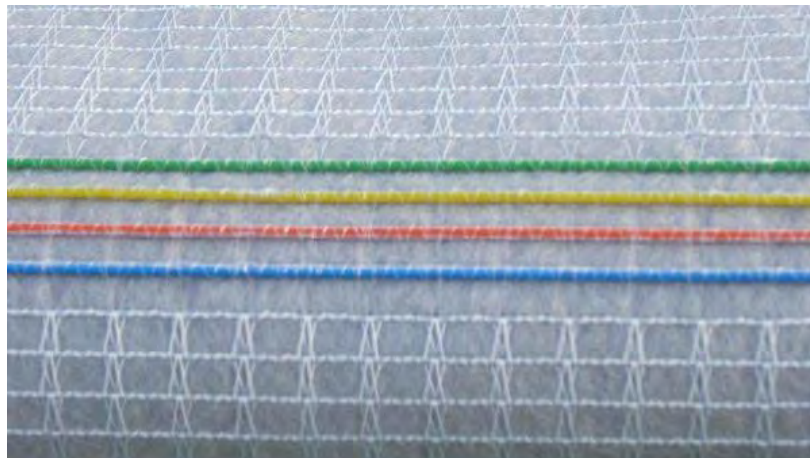


SENSORES ASG (Asphalt Strain Gages)

Una solución innovadora basada en la combinación del uso de un geotextil de protección básico, con la tecnología de toma de datos mediante cables de fibra óptica, que se ha desarrollado y testado para medir las deformaciones y la temperatura de las capas de mezcla bituminosa a cierta profundidad. Dicha tecnología permite conjugar la capacidad de la fibra óptica de conducir la luz con la capacidad de un sistema Fiber Bragg Grating (FBG) (Rejilla de fibras tipo Bragg) de medir las variaciones de las longitudes de onda, debidas a los cambios de temperatura y a las deformaciones motivadas por el paso del tráfico.

5.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FIBRA

5.4.1.1 ÓPTICA-GEOTEXTIL



GEOTEXTIL CON SENSORES INTEGRADOS

La tecnología de un sensor FBG consiste en crear una perturbación del índice de refracción a lo largo de la longitud del cable de fibra óptica, introduciendo este en el núcleo de la misma. La rejilla de Bragg permite leer las variaciones de longitud de onda de la luz transmitida por la fibra óptica.

Estas variaciones dependen de las deformaciones que afecten al conjunto fibra-rejilla de Bragg, causadas por cambios de temperaturas, de presión, de vibración etc, que se leen como desplazamientos o cambios de magnitud de la onda reflejada.

En conclusión se puede decir que un sensor FBG permite la reflexión de algunas longitudes de onda del espectro de la luz, y transmite todas las de demás.

Para medir las variaciones de temperatura y las deformaciones de la fibra, hacen falta dos sensores FBG, como se observa en la figura 5.9. Un sensor permite leer las deformaciones asociadas a los cambios de temperatura mientras que el otro lo hace con las deformaciones asociadas a tensiones externas.

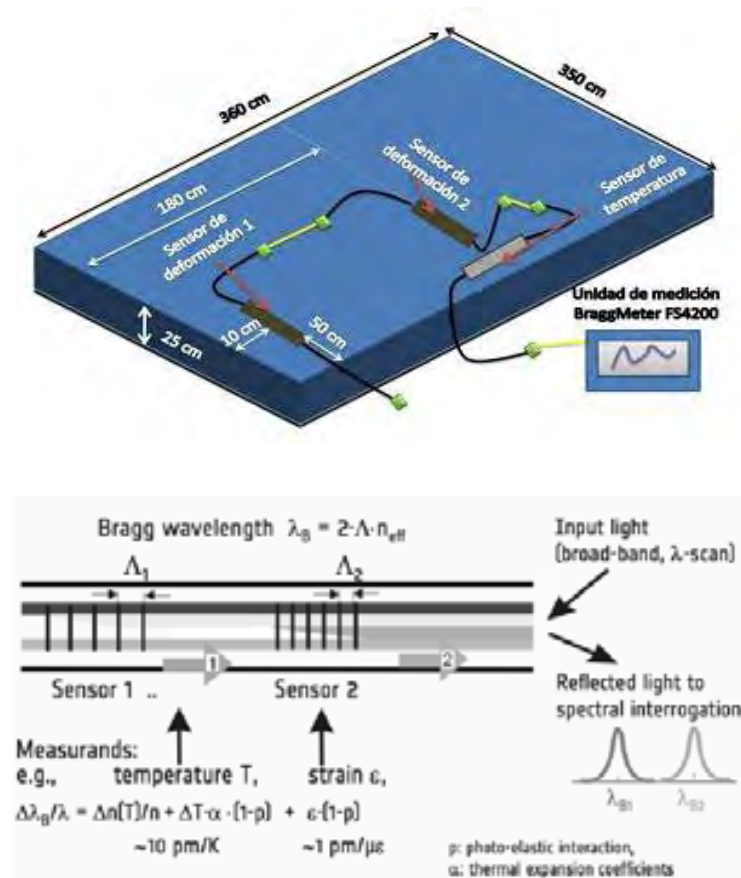


Figura 5.9. Estructura de la fibra óptica con dos sensores FBG

El hecho de incorporar los cables de fibra óptica, con sus sensores FBG asociados, dentro de un geotextil básico de protección, permite obtener un instrumento de medida muy potente y preciso para muchas aplicaciones en el sector de la ingeniería civil, particularmente en aplicaciones relacionadas con el campo de la geotecnia.

En el caso de la aplicación que se describe en este trabajo, el geotextil, dada la fuerte conexión con las fibras ópticas y su alto grado de adherencia a la capa de mezcla bituminosa, permite una elevada transferencia de los movimientos del geotextil a las fibras, de tal manera que se permitan medir deformaciones menores del 0,01% y variaciones de temperatura del orden de 0,1°C.

5.4.1.2 PRUEBAS DE LABORATORIO

La primera fase de la investigación fue tratar de estudiar y entender si las altas temperaturas de la mezcla bituminosa durante el extendido y la compactación posterior, pudieran dañar el sistema geotextil-fibra óptica.

Para ello, primero se llevó a cabo una prueba a escala reducida, en laboratorio y después otra a escala real in situ, sobre un tramo de prueba.

La prueba de laboratorio se hizo sobre una probeta prismática de dimensiones 40 cm x 30 cm x 6 cm. Ver figura 5.10.

Se ejecutaron dos capas de mezcla bituminosa de tipo “asphalt concrete” de 3 cm de espesor separadas por un geotextil donde se han colocado dos cables de fibra óptica cada uno con un sensor FBG, distanciados de 12 cm entre ellos.

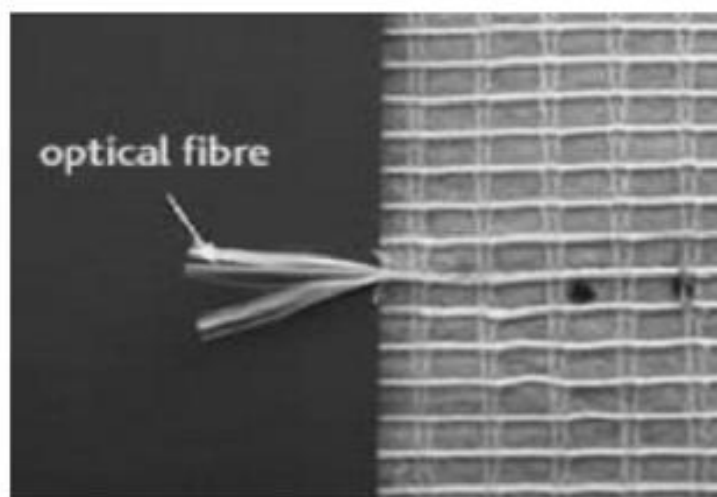


Figura 5.10. Detalle de la fibra óptica insertada en el geotextil



Las dos capas han sido ejecutadas mediante un Roller Compactor utilizando como normativa de referencia la AASHTO TP 8/94 -321 (Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of a Compacted Hot Mix Asphalt subjected to repeated flexural bending).

Siguiendo esta normativa, en estas pruebas se han utilizado varios tipos de carga (carga de impulso, rectangular, senoidal) con el objetivo de obtener una deformación horizontal en la parte inferior de la probeta de 100 microstrains, en el caso de las cargas de impulso y rectangular, y para las cargas senoidales (frecuencia de 1Hz) unas deformaciones horizontales respectivamente de 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800 microstrains.

Los gráficos representan las deformaciones registradas por la fibra óptica puesta entre las dos capas de mezcla de 3 cm cada una. En el caso de la carga de impulso, con frecuencia 1 Hz, se repite a lo largo del tiempo y se observa, paralelamente, que la deformación va aumentando. Esto se debe al aumento del deslizamiento entre el geotextil y la capa de asfalto a lo largo del tiempo, y no por un agotamiento estructural de la capa bituminosa, porque el número de ciclos de carga aplicado no es tan elevado como para causar daños en la citada mezcla.

Este test de laboratorio entre otros aspectos, permite concluir que los cables de fibra óptica son capaces de detectar las diferentes formas y amplitudes de carga aplicadas.

5.4.1.3 PRUEBAS Y APLICACIONES IN SITU

El reto posterior consistió en analizar el comportamiento del sistema geotextil-fibra óptica a escala real, bajo el efecto de cargas de tráfico reales.

El primer paso fue verificar si el conjunto geotextil- fibra óptica era compatible con las tensiones generadas durante las operaciones de extendido y compactación de la mezcla bituminosa en caliente.



Para esto se llevó a cabo un sistema geotextil-fibra óptica, en dos secciones, cada una dotada de dos cables de fibra óptica con 11 sensores FBG, puesto a una distancia de 1 m, sobre una longitud total de 5 metros.

El geotextil de cada sección posee unas dimensiones de 1,06 m x 10 m.

Todo el sistema ha sido instalado justo antes de una estación de pesaje, con objeto de poder correlacionar las deformaciones medidas mediante los cables de fibra óptica, por el paso de los vehículos, con el peso efectivo de los propios vehículos que las solicitaron.

Estas pruebas empezaron en el Octubre del 2011 con el objetivo de medir las deformaciones a lo largo de un año, y de evaluar también como le afectan los cambios estacionales y los cambios de temperatura a la capacidad estructural del firme, mediante las lecturas de los sensores.

El sistema geotextil-fibra óptica se colocó sobre la superficie de una capa bituminosa libre de suciedad. Sobre el geotextil se aplicó un riego de adherencia con emulsión bituminosa con una dotación de 1,5 kg/m² de betún residual. Y posteriormente se extendieron 10 cm de mezcla bituminosa en caliente, formando una carpeta de dimensiones 10 cm de alto y 2,40 m de ancho. (Ver figura 5.11).



Figura 5.11. Compactación de la carpeta



Este sistema ha sido probado tanto a escala reducida en laboratorio, como a escala real, en tramos de prueba. A partir de estas pruebas se ha demostrado su compatibilidad con las operaciones de extendido y compactación de las capas de asfalto, con las altas temperaturas de extendido y con las cargas de tráfico que lo solicitan, tras su instalación.

Este sistema, también, abre la puerta a otros estudios y aplicaciones, como la posibilidad de embeber los cables de fibra óptica y sus sensores asociados en un geosintético de refuerzo del firme, con objeto de mantener las funcionalidades descritas en el presente artículo, pero además conseguir retrasar y prevenir la reflexión de las fisuras desde las capas inferiores de las mezclas bituminosas hasta la capa de rodadura.

Además mediante estos sistemas se puede analizar y controlar el tráfico (número de vehículos, número de ejes con sus respectivas cargas), o el comportamiento de cada capa en tiempo real, a partir de la temperatura y de las deformaciones que se generan durante la vida del pavimento.

Conviene destacar que esta tecnología está todavía en fase de desarrollo y se echa en falta, por ejemplo, la creación de un software que permita al usuario tener en pantalla los resultados ya interpretados a partir de las curvas de deformaciones (microstrains) en función del tiempo, o la posibilidad de visualizar automáticamente la vida residual del firme, o los gráficos de las estadísticas de los vehículos pesados, o los espectros de carga, o incluso visualizar los modelos de evolución del firme. Igualmente, también se podría asociar a las salidas gráficas, imágenes de vídeo o imágenes topográficas en 3D (tomadas periódicamente con sistemas láser) para asociar a las cargas que pasan en el tiempo, las deformaciones plásticas del firme, para estudiar por ejemplo la evolución de roderas.



El objetivo principal se caracteriza por dotar al ciudadano de interfaces inteligentes e intuitivas que se encuentran integradas en el pavimento cotidiano, capaz de reconocer y responder a la presencia y necesidades de diferentes individuos, de una forma completamente discreta e imperceptible.



EL PROPÓSITO DE LA CALLE INTELIGENTE ES LOGRAR LA INTERCOMUNICACIÓN ENTRE LOS USUARIOS DE LAS CARRETERAS A TRAVÉS DE SEÑALES INALÁMBRICAS.

5.5.1 INTEGRACIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

El Pavimento Inteligente es aquel que presenta la particularidad de que en su interior aloja elementos no propios del pavimento (componentes eléctricos, electrónicos, de radiofrecuencia, comunicaciones, así como para telefonía y alojamiento de cualquier tipo de energía). Por lo que, además de cumplir la función convencional (servir de elemento decorativo y hacer transitables las vías de paso o estancias abiertas o cerradas), cumple una segunda función, dando soporte de infraestructura a los servicios de la Calle Inteligente.



DISPOSITIVO ELECTRÓNICO INTEGRADO AL PAVIMENTO. EMITE SEÑALES INALÁMBRICA A LOS DISPOSITIVOS FIJOS O MÓVILES CERCANOS

Se aborda el proceso de implantación de Pavimento Inteligente con servicios inalámbricos teniendo en cuenta los siguientes principios:

-Respetuoso con la pavimentación existente. Integrando el Pavimento Inteligente en el entorno, con el mismo grado de cumplimiento de legalidad y eficiencia que el instalado en la actualidad.

-Respeto con la Normativa Legal. Sin vulnerar las limitaciones, en especial, las relativas a telecomunicaciones en materia de aprovechamiento de la Banda de Uso Común y en particular, cualquier normativa aplicable a seguridad, protección de datos personales, y medidas de implantación de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones. Así como el cumplimiento del estándar EPI - Intelligent Environments Pavement Standard.

-Integración de servicios. De forma regular y adecuándose al entorno. Haciendo un modelo integrador único para las comunicaciones y los servicios que se prestan a los usuarios, como canal inalámbrico-ubicuo.



5.5.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

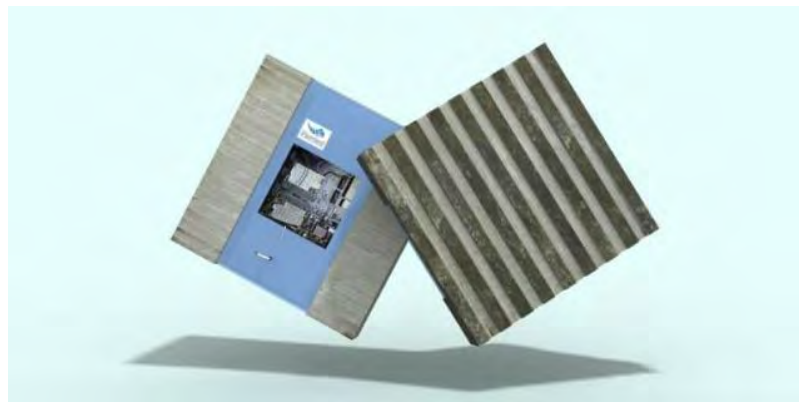
El sistema de pavimento inteligente está basado en:

1. Patente Internacional, acerca de la infraestructura de pavimentación especial sobre el que se realiza la propagación de radiofrecuencia y prestación de servicios.
2. Integración de tecnologías inalámbricas existentes (Bluetooth™ y WiFi entre otras).
3. Capacidad de conectividad (bajo demanda) con otros componentes electrónicos actuadores que presten servicios adicionales.

La prestación del servicio se realiza en la propia calle, usando baldosas que se encargan de realizar la propagación del servicio con un alcance, según zonas y tecnologías, de entre 10 y 25 metros de ancho, en función de diversos factores que posibilitan la propagación de la señal.

5.5.3 PIEZA DE PAVIMENTO INTELIGENTE

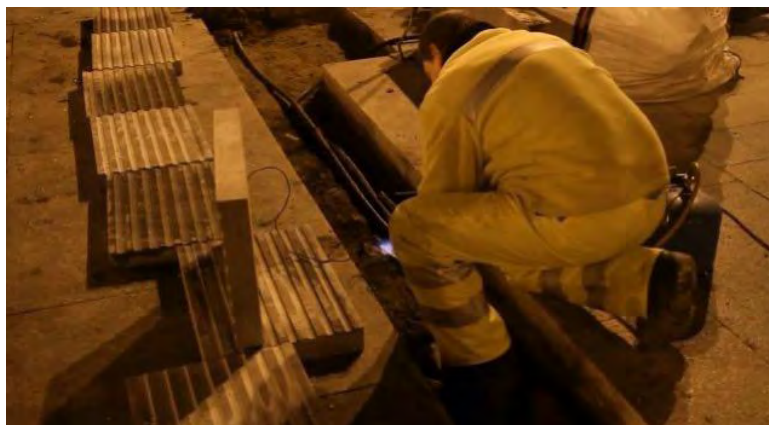
La losa de carbonato cálcico empleada actualmente es gris con superficie antideslizante hacia el exterior, mientras que la cara opuesta será la que se coloque sobre el piso.



PIEZA DE PAVIMENTO CON DISPOSITIVO HOSTPOT IPAVEMENT INTEGRADO

En algunas de las piezas se alojan dispositivos Hotspot iPavement, que cumplen con requisitos de almacenamiento y servicios de forma independiente que permiten la prestación de servicios.

La alimentación de la pieza se realiza mediante cableado en los puntos de acceso, siempre en Baja Tensión.



INSTALACIÓN DE DISPOSITIVOS IPAUMENT EN PAVIMENTO

5.5.4 APLICACIONES ACTUALES PARA LA CALLE INTELIGENTE



CALLE INTELIGENTE IPAUMENT



iPavement constituye una nueva generación de pavimento inteligente, con sistema operativo, aplicaciones y sensores que dotan a las calles de múltiples funcionalidades, sirviendo de canal de comunicaciones a los ciudadanos.

iPavement, a través de VIACITIES OS, integra servicios como planos de la ciudad y del transporte público, ocio, bibliotecas virtuales, promociones para la zona, así como acceso a Internet e información de los principales eventos de la ciudad. Todo ello de forma inalámbrica mediante WiFi y mensajes Bluetooth™ directamente a los móviles, tabletas, etc.

Además, iPavement, cumple la normativa del estándar internacional “Intelligent Environments Pavement Standard”, de forma que las organizaciones y administraciones públicas sean capaces de implantar el pavimento inteligente en sus ciudades con garantía de servicio, suministro, mantenimiento y conexión con otras urbes.

iPavement, lleva incorporado sensorización de vibración y temperatura, que permite registrar datos y sincronizarse con los servicios para actuaciones en esa materia.

Las Aplicaciones que aporta normalmente iPavement, además de todas aquellas que pueda integrar el cliente, desarrolladas a medida o estándares, son las siguientes:

- Bibliotecas en el pavimento que permite la publicación de obras locales, para promoción cultural y distribución de obras digitales.
- Catálogos sobre el mapa de la zona, sus referencias claves de cultura, patrimonio, gastronomía, etc.
- Reproducciones de sonido con contenidos elegidos (Repertorio local, cancioneros, etc., reproducibles en el móvil, permite a la ciudad una difusión de todos sus eventos).



-
- Gestión de cupones para promoción de productos emitiendo al móvil el “cupón promoción”.
 - Avisos inteligentes mediante Bluetooth™ ante eventos parametrizados.
 - Avisos inteligentes mediante Bluetooth™ para información turística, de eventos y publicidad comercial.

5.5.5. PROCESO CONSTRUCTIVO

5.5.5.1. FASES DE EJECUCIÓN

- Trazo y nivelación.
- Preparación de la explanada.
- Excavación de zanjas.
- Instalación de red eléctrica según normativa de Baja Tensión.
- Colocación de cajas de derivación.
- Firme y relleno de zanjas.
- Vaciado, tendido y vibrado del concreto.
- Protección del concreto fresco frente a lluvias, heladas y temperaturas elevadas.
- Curado mediante riego que no produzca deslavado.
- Limpieza y humectación de la base.
- Vertido de la capa de arena.
- Vertido del mortero.
- Espolvoreo con cemento de la superficie de la capa de mortero.



-
- Asentado y nivelación de las piezas.
 - Relleno de juntas de separación entre losetas.
 - Protección del elemento frente al tránsito, lluvias, heladas y temperaturas elevadas.

En caso de colocación de pieza dotada de Hotspot iPavement™:

- Instalación y conexión en Baja Tensión.
- Comprobación del funcionamiento general del emisor.
- Fijación de pieza de Pavimento Inteligente con punto de Hotspot iPavement™.

5.5.5.2. PREPARACIÓN DEL SOPORTE.

Las superficies de trabajo se tratarán de forma que en el momento de la aplicación de los diferentes materiales se encuentren en condiciones de facilitar la adherencia de los mismos.

Se eliminarán de la superficie de trabajo lechada de cemento superficial, restos de grasas y aceites, partes de hormigón mal adheridas y restos de otras aplicaciones, mediante el empleo preferentemente de medios mecánicos.

El soporte tendrá una resistencia a tracción mínima de 1 N/mm² y presentará una porosidad y rugosidad superficial suficiente para facilitar la adherencia de los productos. La temperatura del soporte se hallará por encima de los +8°C.

5.5.5.3. COLOCACIÓN DE PIEZAS.

Para conseguir una buena adherencia y una larga duración deberán tenerse en cuenta los siguientes factores:



- Seguir estrictamente las recomendaciones del fabricante en la preparación de los adhesivos.

- Preparar la mezcla mediante elementos de batido mecánico, de forma que se consiga un producto homogéneo y sin grumos.

- La colocación con doble encolado, tanto en el soporte como en la pieza, garantiza la perfecta adhesión sin que se formen huecos entre éstas áreas y el soporte.

- El “peinado” del adhesivo sobre el soporte, con una llana dentada de tamaño de diente adecuado, asegura un espesor regular y una buena distribución del pegamento por toda la superficie.

- Una vez colocadas, se procederá a un batido enérgico pieza a pieza, de forma que se consiga un buen asentamiento. Periódicamente se levantarán piezas colocadas para comprobar el perfecto macizado del adhesivo.

- Se limpiarán todas las juntas de los posibles restos de adhesivo para poder realizar posteriormente un correcto rejuntado (separación recomendada 1.5 a 2 mm).

- Las zonas recién pavimentadas deberán señalizarse convenientemente a fin de evitar que el área pavimentada sea transitado antes del tiempo recomendado por el fabricante del adhesivo.

5.5.5.4. CONDICIONES DE TERMINACIÓN

- Superficie plana.

- Evacuación de aguas.

- Buen aspecto.



5.6 PAVIMENTOS SOLARES

Actualmente las carreteras están hechas principalmente a base de asfalto, que a su vez es un producto sólido del petróleo. La rapidez con la actualmente estamos utilizando y quemando nuestras reservas de crudo es dudable que en cincuenta años tengamos suficiente para seguir tapizando nuestras calles y carreteras con él.

Dos innovadores proyectos nos presentan propuestas alternativas que no solo buscan cubrir las carreteras del mundo sino utilizar la energía que actualmente desperdician. Parece difícil visualizar que las carreteras del mundo puedan ser utilizadas como una fuente de energía, pero lo son. Una carretera básicamente es un tramo enorme que no hace más que recibir luz del sol y calor todo el día para después perderlo durante la noche. (Figura 5.12)



FIGURA 5.12. PROYECTO DE CARRETERA SOLAR.

La primera propuesta Solar Roadways busca aprovechar la energía que las carreteras reciben y aprovecharla. Los creadores Julie y Scott Brusaw idearon un método para aprovechar la luz solar de las carreteras utilizando paneles solares y placas de vidrio.



A pesar de que generalmente asociamos el vidrio con la fragilidad, los creadores de Solar Roadways explican de una manera muy elocuente que el material es capaz de resistir el peso y presión de camiones de 18 ruedas.

Las ventajas que ofrece la utilización de vidrio, son que se puede manufacturar para que sea más resistente que el hierro, ya sabemos cómo arreglarlo, cómo protegerlo de daños y cómo reducir costos de manufactura. (Figura 5.13).

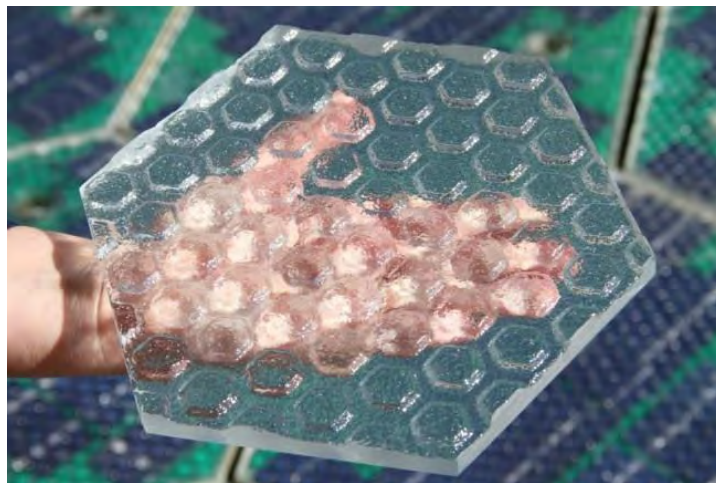


FIGURA 5.13. PANEL SOLAR A BASE DE PLACA DE VIDRIO

La primera propuesta es particularmente innovadora porque sugiere la creación de carreteras que eventualmente pagaran por su costo y adicionalmente aportaran a la economía con la creación de energía renovable.

La segunda propuesta es de Wave (Wireless Advanced Vehicle Electrification) cuya meta es lograr que la circulación de autobuses eléctricos sea más barata que aquellos con diesel o gas natural, sin estar conectados a cables de ningún tipo. Por el momento ese tipo de autobús sólo puede recargar energía en la base, lo que significa que tienen que cargar con muchas baterías recargables lo que los hace ineficientes, pesados y costosos.



Lo que el equipo de Wave busca hacer es transmitir la energía sin cables a través de inducción magnética (Figura 5.14). La solución que ofrecen es: instalar un equipo de recepción de ondas inductoras en la parte de abajo del autobús y luego instalar varios equipos de transferencia magnética inductora en paradas de autobuses. Así cuando el autobús se detiene a recoger a los pasajeros se cargará a través del equipo sin cables. En pocas palabras, menos baterías, menos peso y más barato. El problema principal es conseguir energía para el equipo que hace la carga de energía en las paradas.

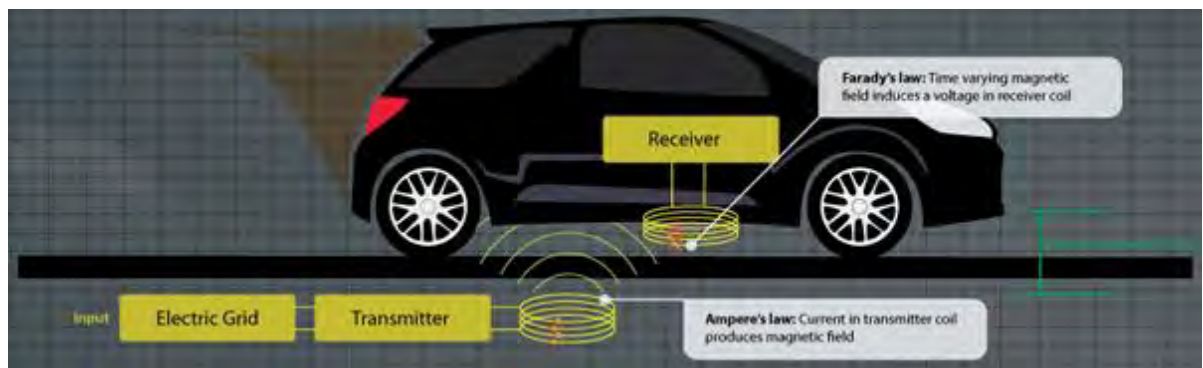
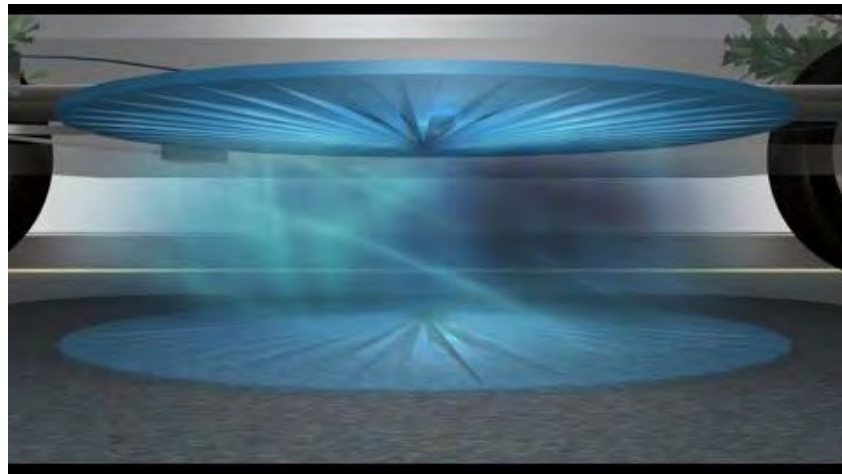


Figura 5.14. Equipo de recepción de ondas inductoras



PAVIMENTO SOLAR

Por otra parte, parece que se ha estado trabajando en mejorar la adherencia de la capa de vidrio para conseguir unas condiciones de conducción aceptables. En la actualidad hablan de poder frenar en los estándares requeridos un vehículo que circule en condiciones de lluvia a una velocidad de 130 km/h.

Otro punto que se ha ido implementando es la masa que pueden soportar los paneles. Desde un primer objetivo de 36.000 kilogramos, trabajan ahora en alcanzar los 114.000 kg. Su viabilidad, siempre en tela de juicio, se ha intentado probar con diferentes fórmulas de ingresos que podrían llegar una vez aplicada la tecnología:

- Por generación de energía.
- Mediante el drenado y transporte de agua limpia de lluvia para urbes o uso agrícolas.
- Alquilando su sistema de telecomunicaciones internos a compañías interesadas.
- Utilizando un sistema de LEDS para crear infinitos y dinámicos espacios de publicidad.



5.6.1 EXPERIMENTOS PIONEROS

Mientras avanzan los experimentos como el del Instituto Politécnico de Worcester (WPI) para convertir el propio asfalto en recolector de sol y usar tuberías subterráneas para generar vapor y energía, Scott Busaw está desarrollando un concepto bastante más complejo.

La base de sus carreteras solares son unos paneles de 30 por 30 centímetros, de

apariencia no muy distinta a las placas

fotovoltaicas. Los paneles constan básicamente

de tres capas: la superficie está hecha de un

material traslúcido, rugoso y de alta

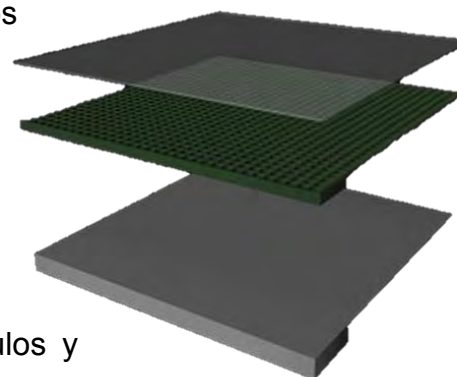
resistencia, para soportar el peso de los vehículos y

permitir la tracción. La segunda capa es la electrónica, donde se

absorbe y se almacena la energía, con células fotovoltaicas y diodos emisores de

luz (LEDs) que permitirán iluminar o pintar la superficie de la carretera. La tercera

capa servirá para distribuir la energía y albergar también los cables de fibra óptica para las comunicaciones.



Bushaw asegura que su visión será posible si se logra fabricar paneles a un

costo medio de 5.000 dólares. Aunque el presupuesto total para reemplazar las

carreteras de asfalto ascendería a 4.800 millones de dólares en Estados Unidos,

el creador de Solar Roadways asegura que sus paneles tendrían una duración

asegurada de 21 años y el precio final de sus carreteras se equipararía a las de

asfalto. El ingeniero eléctrico afirma que sus carreteras resistirán accidentes y

serán inteligentes. Podrán generar calor para disolver la nieve y enviar mensajes a

los automovilistas para hacer más fluido el tráfico. Contarán con aparcamientos y

dispositivos para recargar los coches eléctricos. Según sus propias estimaciones,

cada kilómetro y medio de carretera solar serviría para dar energía a 500 casas.



5.7 PAVIMENTOS VERDES (PAVEGEN)

La necesidad de construir pavimentos ecológicos se debe a los altos índices de contaminación que se generan durante el proceso constructivo. Por esa razón, en la actualidad se están creando nuevas técnicas de construcción de pavimentos de tal forma que sean amables con el medio ambiente, de ahí la necesidad de diseñar pavimentos verdes o ecológicos que no solamente tengan la función de no contaminar sino que se aproveche la tecnología del diseño y se construyan pavimentos que ofrezcan no solo el servicio peatonal y vehicular sino también sean capaces de generar energía propia, entre otras varias capacidades que puedan ofrecer a los usuarios.

El concepto de Pavegen fue desarrollado en 2009 por Laurence Kemball-Cook. Los bloques, fabricados con plástico reciclado, recolectan la energía del impacto de los pasos de la gente y suministra de pequeñas descargas de electricidad a los aparatos eléctricos cercanos. También almacenan energía en una batería integrada.

Los bloques (Figura 5.15), de 45 x 60 centímetros, están pensadas para zonas en las que se concentra mucha gente, como estaciones de tren, de metro, de autobús, aeropuertos, colegios y centros comerciales. La energía generada por millones de pisadas puede ser utilizada en múltiples aplicaciones, como iluminación de señales, anuncios digitales o zonas Wi-Fi.

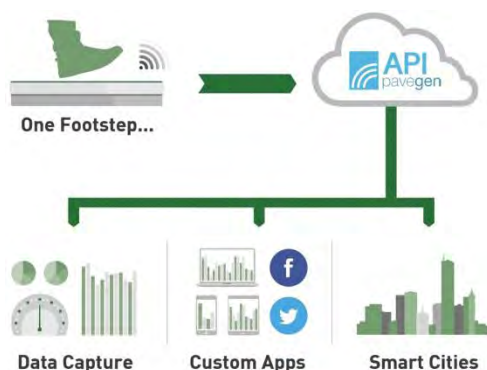


FIG. 5.15 – DIMENSIONES DEL BLOQUE DE PAVIMENTO PAVEGEN

En Reino Unido y Europa se han llevado a cabo casi 30 proyectos de Pavegen, tanto permanentes como temporales. Desde hace dos años cuatro de estos bloques, colocados en la Simon Langton Grammar School para chicos, cerca de Canterbury, obtienen energía de las pisadas de sus 1,100 estudiantes para mantener la iluminación del pasillo. Igualmente, han sido de utilidad en festivales de música para cargar teléfonos móviles y encender luces de tecnología LED.

5.7.1. LA ENERGÍA DE LAS PISADAS

Una vez que los bloques Pavegen convierten la energía en electricidad, el 5% se utiliza para iluminar el logo LED de los propias bloques, y el 95% puede ser directamente utilizado o almacenado para un uso posterior. Pavegen está en la actualidad trabajando en un nuevo sistema que alimentará directamente la red eléctrica. Los bloques son resistentes al agua, por lo que pueden soportar lluvia, nieve y hielo; y las pruebas efectuadas han demostrado que podrían durar al menos cinco años, pero Kemball-Cook afirma que lo ideal sería que duraran 20.



Los bloques están diseñados para reducir al mínimo la huella de carbono. El revestimiento superior está hecho de goma reciclada de neumáticos y aproximadamente el 80% de los polímeros utilizados para el resto de los componentes puede ser reciclado.



Un paso genera en promedio 7 vatios de electricidad, aunque depende del peso de la persona, y cada paso empuja 5 milímetros hacia abajo la goma, diferencia «imperceptible para los peatones», según Kemball-Cook.

Los costos, sin embargo, representan un problema. Al igual que el resto de las tecnologías «verdes», los primeros bloques Pavegen no eran baratas.

Los bloques de pavimento que convierten la energía de los pasos de la gente en electricidad están listos para ayudar a generar energía.



GENERACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA CON LAS PISADAS A LA GENTE

5.7.2. NUEVAS APLICACIONES DE UN ANTIGUO CONCEPTO

La idea de aprovechar la energía que se genera con las pisadas no es algo nuevo. Otras empresas, como Sustainable Dance Club y POWERleap fabrican productos similares utilizando materiales piezoeléctricos. La piezoelectricidad, descubierta por primera vez en la década de 1880 por Pierre y Jacques Curie, se produce cuando ciertos cristales, como cuarzo, topacio o azúcar de caña, son sometidos a presión. Es la base de los relojes de cuarzo y algunos sensores, incluidos los airbags de los coches.



5.7.3. EFECTO PIEZOELÉCTRICO

La palabra “piezo” se deriva de la palabra Griega: $\pi\epsilon\zeta\omega$ que significa estrechar, apretar u oprimir. En 1880, Jacques y Pierre Curie descubrieron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se establecían cargas eléctricas en éste; ellos llamaron a este fenómeno “el efecto piezoeléctrico”. Más tarde ellos verificaron que un campo eléctrico aplicado al cristal proporcionaba una deformación al material. Este efecto era referido como “efecto piezo inverso”. Los materiales piezoeléctricos, por lo tanto, pueden ser utilizados para convertir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

En el campo de la ingeniería el uso más común del fenómeno piezoeléctrico, actualmente, es en los actuadores piezoeléctricos. Un actuador piezoeléctrico es un dispositivo que produce movimiento (desplazamiento) aprovechando el fenómeno físico de la piezoelectricidad. Los actuadores que utilizan este efecto están disponibles desde hace aproximadamente 20 años y han cambiado el mundo del posicionamiento de precisión. El movimiento preciso que resulta cuando un campo eléctrico es aplicado al material, es de gran valor para nano posicionamiento

5.7.4. TIPOS DE ACTUADORES PIEZOELECTRICOS

5.7.4.1. ACTUADOR TIPO PILA

La configuración más común en un piezo actuador es el tipo “pila” de varias capas de cerámico con dos salidas eléctricas. Para proteger el cerámico contra influencias externas, este se ubica dentro de una carcasa de metal. A esta carcasa se le pueden incorporar resortes para comprimir el cerámico de tal forma que permita la operación de tensión y compresión. La figura 5.16 muestra un esquema del diseño eléctrico de un piezo actuador tipo pila.

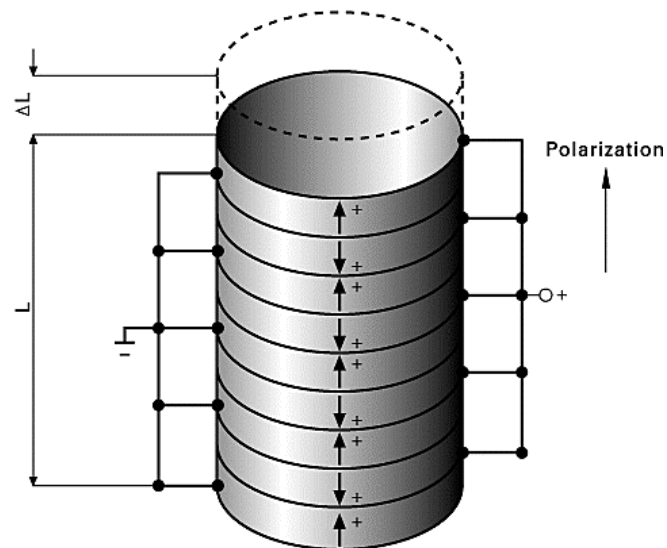


FIGURA 5.16 – DISEÑO DE UN ACTUADOR PIEZOELÉCTRICO TIPO PILA

5.7.4.2. ACTUADORES “FLEXURE”

En algunas aplicaciones un solo actuador tipo pila no es suficiente para desempeñar tareas complejas. Por ejemplo, cuando un movimiento recto es necesario y solo puede ser tolerada una desviación nanométrica desde la trayectoria ideal, un actuador tipo pila no puede utilizarse porque puede inclinarse algo así como unos 10 arcosegundos mientras se está expandiendo. Si la pila y la parte a ser movida están desacopladas y se emplea un sistema guía de precisión puede lograrse un excepcional control de la trayectoria.

La mejor guía de precisión puede lograrse con el nanoposicionador “Flexure” el cual cuenta con un amplificador de movimiento integrado (Figura 5.17).



FIGURA 5.17 – NANOPOSICIONADOR TIPO “FLEXURE” Y SCANNER CON AMPLIFICADOR DE MOVIMIENTO INTEGRADO.

5.7.4.3. PIEZO ACTUADORES COMBINADOS CON SISTEMA DE POSICIONAMIENTO MOTORIZADO DE AMPLIO RANGO

Los Piezo actuadores pueden combinarse con otros actuadores para formar un sistema de alta resolución de amplio rango.

La figura 5.18 muestra un ejemplo que combina un piezo actuador con un tornillo motorizado. Esta combinación provee 25 mm de movimiento burdo pero conserva las características de alta de resolución intrínsecas a los piezoactuadores.



FIGURA 5.18 – COMBINACIÓN DE UN PIEZO ACTUADOR Y UN TORNILLO MOTORIZADO.



De esta forma es como se puede generar pequeñas cantidades de energía aprovechando los esfuerzos aplicados con las pisadas de la gente.

Es muy interesante darse cuenta de la forma en que estos recursos son aprovechados y transformados en energía que sirve para el beneficio de la misma gente.

Sin embargo y como ya se vio, es una tecnología que se aplica a bloques ubicados estratégicamente en zonas de mayor afluencia peatonal. No se ha aplicado esta tecnología en carreteras o integrado a la estructura de los pavimentos flexibles, y sobre todo, no es una tecnología que se utilice en México, pero es una realidad y en poco tiempo puede implementarse esta tecnología en las carreteras. Lo que sería de gran beneficio, no solo para alimentar de energía a los dispositivos electrónicos de la misma vialidad si no también, considerando la enorme cantidad de vehículos que transitan en zonas urbanas, la cantidad de energía generada puede ser mucho mayor y se puede aprovecharse en gran escala.



5.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentaron algunas aplicaciones tecnológicas utilizadas en los pavimentos flexibles, las cuales, en su mayoría son prototipos que aún no se lanzan al mercado debido a los altos costos de producción. Tecnología y diseños que pueden considerarse como pavimentos del futuro.

Como ya se dijo, los altos costos son el factor principal por los que la mayoría de estos productos siguen siendo pruebas de laboratorio o pequeñas demostraciones. Pero si se consideraran los beneficios que se pueden obtener de acuerdo a las funciones de cada producto, las inversiones valdrían la pena y los países se verían beneficiados económica y ambientalmente. Porque se tratan de pavimentos que aprovecharan recursos naturales como la luz solar, el agua de lluvia y la energía dinámica de la misma gente, con el objetivo de proveer pavimentos funcionales y de alto desempeño.

¿Cuáles son las probabilidades de que en México se utilicen las tecnologías dentro de los pavimentos flexibles, mostradas a lo largo del capítulo?

Conclusión: cualquier tecnología o producto innovador en diseño y resistencia que ofrezca al pavimento, puede ser utilizada en México siempre y cuando el gobierno se proponga invertir en ello, analizando las opciones más viables y que generen mayores beneficios a la sociedad y a la economía del país.

Para contribuir al interés del gobierno y los particulares, se deben hacer investigaciones y difusiones sobre los grandes beneficios y ventajas que se pueden llegar a obtener mejorando la estructura no solo de los pavimentos rígidos sino también de los pavimentos flexibles.



CONCLUSIONES GENERALES

Dentro de los cinco capítulos presentados en este trabajo, se realizó una investigación sobre la evolución de los pavimentos flexibles en México a través del tiempo.

Se plantearon las principales necesidades que fueron la causa primigenia para la creación de los primeros caminos, y se concluye que durante la época de los Aztecas y el resto de las civilizaciones del país, las necesidades de comercio y ampliación territorial, obligaron a los pobladores a construir esas brechas y modificar las condiciones naturales de las veredas con la finalidad de poder trasladarse y mover sus herramientas, mercancías y a la gente. Con la llegada de los españoles y los primeros medios de transporte, comenzó la necesidad de construir caminos más elaborados.

Durante la conquista, se construyeron extensos caminos que comunicaban diferentes partes del país, denominados “caminos de Plata”, en donde se comprobó que a pesar de las condiciones predominantes, los pobladores de aquella época fueron capaces de construir caminos tan importantes con herramientas manuales y materiales propios de la región y fue tal la calidad de los trabajos que hasta la fecha se conservan algunos tramos en condiciones aceptables los cuales ahora nos sirven para estudiar lo que ahora ya sabemos.

A consecuencia de las guerras que se dieron en el país y los caminos destrozados, surge la necesidad de construir de nuevo carreteras que con el paso de los años, fueron los troncos viales de comunicación entre importantes ciudades y para las cuales se crearon instituciones encargadas su construcción y mantenimiento.



Y también se convirtieron en importantes indicadores económicos para el país, pues como ya se demostró en este trabajo, el crecimiento económico del país se ve reflejado en su infraestructura, considerando importante la red federal de carreteras.

El objetivo de incluir en esta tesis los métodos de diseño de pavimentos utilizados en la actualidad, es para identificar el origen y las consideraciones que se hacen en laboratorio para los pavimentos actuales y que servirán de punto de partida para el desarrollo de nuevas tecnologías.

Es así como se expone en el tercer capítulo, las tecnologías que se utilizan en México para los pavimentos flexibles. Se observó que las modificaciones se realizan en las diferentes capas que conforman el pavimento, incluyendo materiales como los geosintéticos, fibras de vidrio en los concretos asfálticos, el asfalto modificado, con polímeros y con diferente finalidad de aplicación, pensando el uso que éstos tendrán de acuerdo a las condiciones del territorio.

En la actualidad, un tema de mucha importancia en la construcción es el medio ambiente. Las construcciones se han apegado a nuevas normas que impiden afectar el entorno natural, debido a los altos índices de contaminación que ya existen no solo en el Distrito Federal sino en varias ciudades de todo el país. La Secretaría del Medio Ambiente junto con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, tienen la tarea de mantener un control riguroso de limitar las altas emisiones de contaminación y de deforestación durante la construcción de carreteras.

Este es un punto muy importante para el crecimiento de la infraestructura por que se imponen normas para no afectar el medio ambiente –que es bondadoso- pero limitan los procesos de construcción. Cabe aclarar que este trabajo no minimiza las leyes de protección al medio ambiente, sino al contrario, es un tema que se expone en el último capítulo.



La protección del medio ambiente se ha vuelto un tema universal, porque vivimos en un mundo con alto índices de contaminación y los países desarrollados se han encargado de crear procesos constructivos que eviten contaminar, utilizando materiales que ayuden a la conservación del mismo.

Las tecnologías presentadas en el último capítulo, demuestran que, en lo que a pavimentos flexibles se refiere, se trata de aprovechar al máximo todos los elementos naturales posibles para crear nuevas fuentes de energía y al mismo tiempo que las carreteras sean autosustentables. Que brinden servicios que actualmente tienen costos elevados y que por medio de las carreteras, se vuelvan gratuitos. También, que tengan la capacidad de absorber energía solar y almacenarla para utilizarse en edificaciones o en las mismas carreteras cuando se requiera.

En el último capítulo se hizo mención de la importancia que tiene el crecimiento económico en México, porque de ello depende que en nuestro país se puedan comenzar a aplicar estas tecnologías y entonces, se revolucionarían los métodos de diseño y el campo de investigación giraría también en torno a la protección del medio ambiente.

Construir carreteras sustentables y procesos constructivos no contaminantes, es lo que se debe hacer en México, con la finalidad reducir los índices de contaminación y que las carreteras prolonguen su tiempo de vida para reducir los periodos de mantenimiento, que también significaría una importante reducción de costos.

Se concluye en este trabajo que todos los periodos estudiados están ligados de forma importante, que a raíz de la necesidad de comunicación y traslado surgieron técnicas y diseños de construcción de acuerdo a la época del momento.



En la actualidad ya se vislumbra el futuro de las carreteras y es importante que trabajos como éste, sirvan como punto de partida para despertar el interés de los diseñadores y del gobierno así como de inversionistas privados por generar campos de trabajo especializados en la ciencia con aplicaciones en las carreteras.

Finalmente, en este trabajo se quiere resaltar la enorme importancia que tienen los pavimentos flexibles hoy en día, que no son obsoletos y que con la implementación de tecnologías, pueden dar mayores rendimientos y beneficios. Aprovechando los recursos naturales e incluso, aprovechando la energía que se genera con el tránsito vehicular y peatonal. Todo es cuestión de romper los paradigmas y cambiar la visión que tenemos del futuro de nuestros pavimentos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y DE CONSULTA

Bibliográficas:

- AASHTO “Guide for design of pavement structures”, *American Association of State Highway Officials*, Washington, D.C., (1993).
- Aguerrebere, R. y Cepeda, F..- “Estado Superficial y Costos de Operación en Carreteras”.- *Publicación Técnica No. 30.- Instituto Mexicano del Transporte*.- Querétaro, México, 1992.
- Checkmate Geosynthetics. “Technical Note, Solution for asphalt cracking”2007.
- Corro, S y Prado, G, “Proyectos de investigación dirigidos al desarrollo tecnológico. Estudio del método actualizado de diseño de pavimentos. Segunda parte D.F.”, *Instituto de Ingeniería, UNAM*, Informe de Investigación a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes N° 9529. México, D.F. (Dic 1992).
- Corro, S., Magallanes, R. y Prado, G..- “Instructivo para el Diseño Estructural de Pavimentos Flexibles para Carreteras”, *Series Instituto de Ingeniería - UNAM, No. 444.- UNAM*, México, D.F., 1981.
- Especificaciones Generales de Construcción con Geosintéticos. Geosistemas Pavco S.A., 2008.
- Huang, Yang H. “Prediction of Fatigue Cracking and Rutting in Asphalt Pavements”; SHRP. United States Of America 1991.
- IMT, “Datos viales de la red nacional”, *Instituto Mexicano del Transporte*, Sanfandila, Querétaro, (Publicación más reciente en el momento de su empleo).
- IMT, “Catálogo de Deterioros en Pavimentos Flexibles de Carreteras Mexicanas”, *Instituto Mexicano del Transporte*, Querétaro, Qro., (1991).



-
- IMT, “Impacto Ambiental de Proyectos Carreteros. Efectos por la Construcción y Conservación de Superficies de Rodamiento: I Pavimentos Flexibles”, *Instituto Mexicano del Transporte*, Sandafilia, Qro. (2001).
 - Mendoza, A. y Cadena, A.- “Estudio de Pesos y Dimensiones. Análisis Estadístico del Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga que Circulan por la Red Nacional de Carreteras. Estaciones instaladas durante 1991”.- *Documento Técnico No. 8.- Instituto Mexicano del Transporte.- Querétaro, México, 1992.*
 - Miguel, C., Elizondo, F., “Actuadores Piezoeléctricos”, *Ingenierías*, Enero-Marzo 2000, Vol. III, No. 6.
 - MOPU, Instrucción 6.1-I.C. y 6.2-I.C., “Secciones de Firme”, *Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo*, Madrid, (1990).
 - Potti, J., “Aplicación de la Nanotecnología y de las Mezclas a Baja Temperatura”, *Proyecto Fénix*, Madrid, España, 2012.
 - Rico, A. y Orozco, J. M.- “Efecto de los Suelos Finos en las Gravas Redondeadas para Bases de Pavimento”.- *VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones.- Lima, Perú, 1979.* Esta referencia puede también consultarse en el Documento Técnico N° 7, publicado por el Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, en 1992.
 - Rovito, G., “Pavimentos Descontaminantes a partir de Sprays”, *CONAMA 2012, Congreso Nacional del Medio Ambiente*, Madrid, España, 2012.
 - Ruckel P.J., Acott S.M. y Bowering R.H., (1982). “Foamed asphalt paving mixtures: preparation of design mixes and treatment of test specimens”, *Transportation Research Board (Transportation Research Record 911)*, Washington DC.
 - SCT, “México y sus Indicadores”, *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*, México, D.F. (2011).
 - SCT, “El Sector Carretero en México, Red Nacional de Carreteras”, *Secretaría de Comunicaciones y Transportes*, México D.F., (2009).



-
- The Asphalt Institute, “Empleos del asfalto, Terminología del asfalto y sus aplicaciones, Ensayos”, *Manual del Asfalto*, Ed. URMO, España (1973).
 - Thenoux G. y García G., (1999). “Estudio de técnicas de reciclado en frío: primera parte”, *Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile*, número 20, Santiago, Chile
 - Thenoux G. y Jamet A., (2002). “Tecnología del Asfalto Espumado”, *Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile*, (en imprenta), Santiago, Chile
 - Zapata V. H. y Aparicio Isidro (2011). “Procedimientos de construcción y trazo del Camino Real en el valle de Ojocaliente”, Zacatecas.

Electrónicas:

- http://www7.df.gob.mx/wb/stv/cinco_siglos_de_transporte_en_la_ciudad_de_mexico_
- <http://www.tierra-armada.cl/sistema.html>
- <http://mexico.cnn.com/planetacnn/2011/10/15/un-pavimento-verde-que-genera-electricidad-sera-probado-en-londres-2012>
- <http://misterios.co/2009/09/21/carreteras-solares-el-asfalto-del-futuro/>
- <http://www.motorpasionfuturo.com/medio-ambiente/solar-roadways-las-carreteras-que-producen-energia-buscan-seguir-perfeccionandose>
- <http://www.ecoosfera.com/2013/03/el-futuro-de-la-transportacion-carreteras-solares-y-energia-renovable-para-automoviles/>
- <http://pavegen.com/technology>
- <https://www.construible.es/articulos/pavimentos-y-edificios-descontaminantes>
- <http://www.proyectofenix.es/Pages/ShowNews.aspx?PostId=254364&SubitemId=441765>
- <http://www.artdecomexico.com/iniciodelascarreteras/>



ANEXO 1
ESQUEMAS, TABLAS Y GRÁFICAS



2.4.3 APLICACIONES DEL ASFALTO

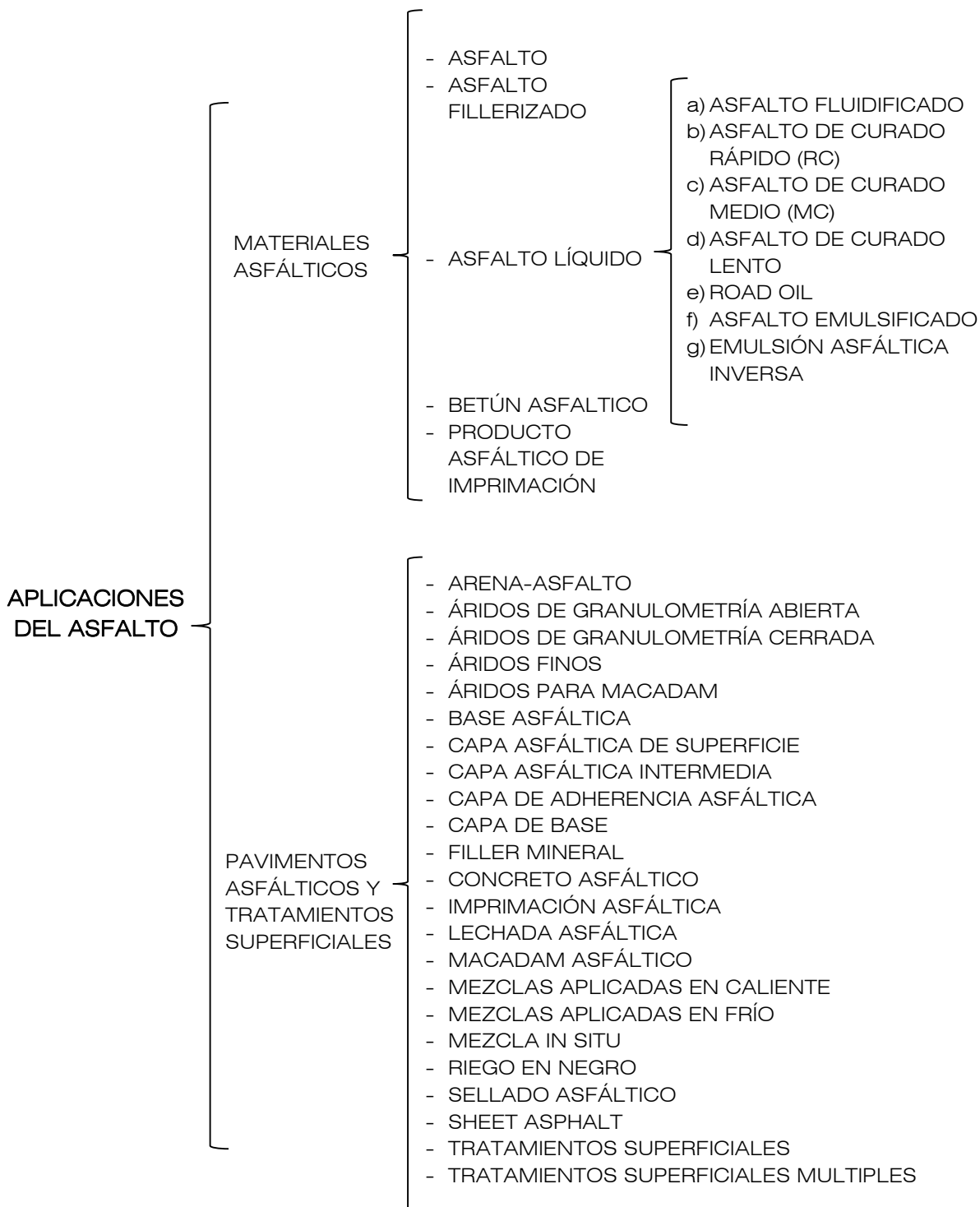




Figura 3.1 EJEMPLO RELACIONES PESO VOLUMÉTRICO SECO – CONTENIDO DE AGUA - VRS, PARA UN SUELO ARCILLOSO.

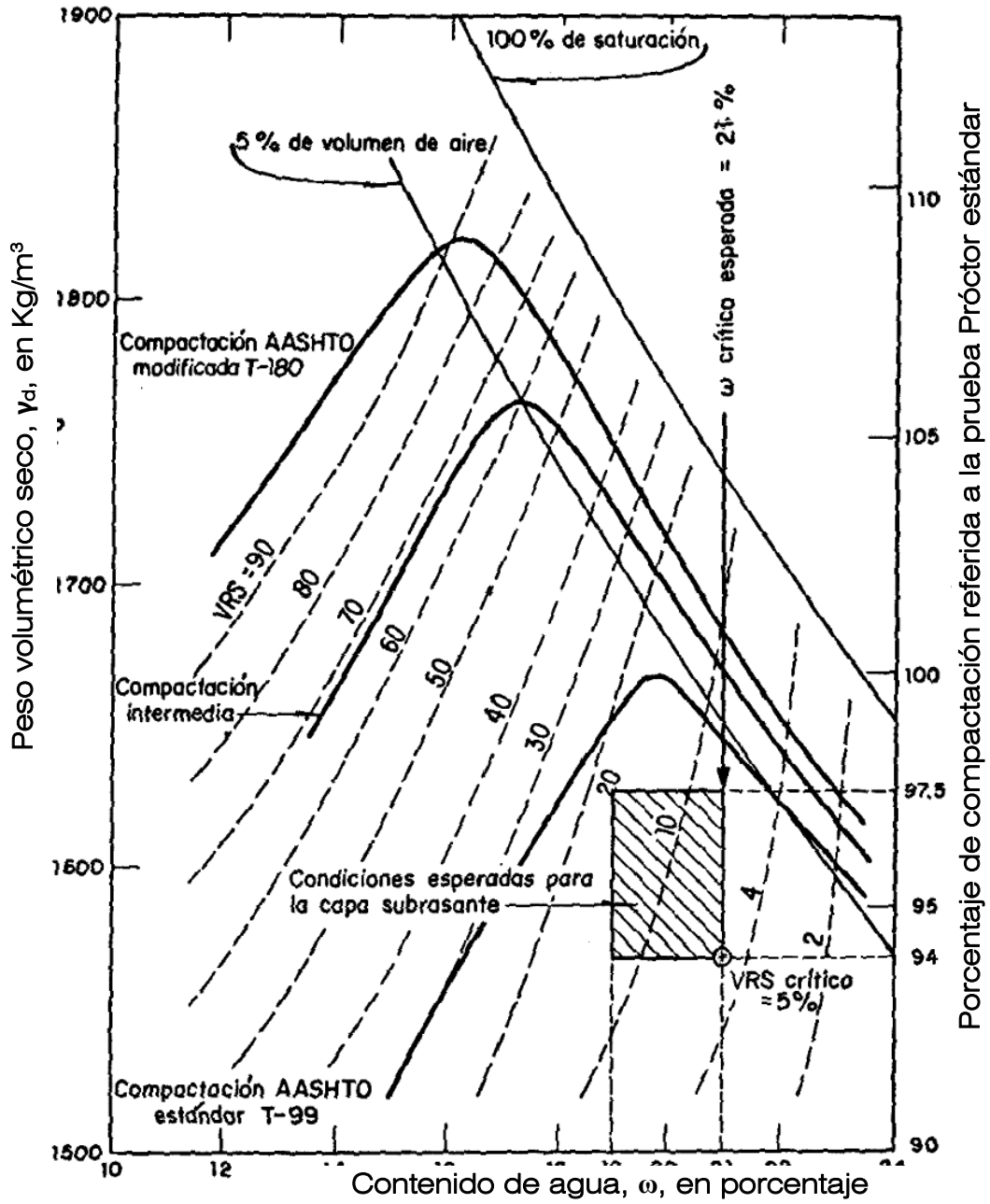




Figura 3.2 CÁLCULO DEL TRÁNSITO EQUIVALENTE ACUMULADO (ΣL).

HOJA: /

CALLETERA:	COMPOSICION DEL TRANSITO	COEFICIENTE DE DISTRIBUCION DE VEHICULOS CARGADOS O VACIOS	COMPOSICION DEL TRANSITO CARGADOS O VACIOS	COEFICIENTES DE DAÑO		NUMERO DE EJES SENCILLOS EQUIVALENTES DE 8.2 ton	
				CARPETA Y BASE Z ¹	SUB-BASE Y TERRACERIAS Z ²	CARPETA Y BASE	SUB-BASE Y TERRACERIAS
TIPO DE VEHICULO	(1)	(2)	(3) = (1) x (2)	(4)	(5)	(6) = (3) x (4)	(7) = (3) x (5)
	CARGADOS						
	VACIOS						
	CARGADOS						
	VACIOS						
	CARGADOS						
	VACIOS						
	CARGADOS						
	VACIOS						
	CARGADOS						
	VACIOS						
	CARGADOS						
	VACIOS						
	CARGADOS						
	VACIOS						
	CARGADOS						
	VACIOS						
SUMAS	1.000	—	1.000			EJES EQUIVALENTES PARA TRANSITO UNITARIO (8)	
COEFICIENTE DE ACUMULACION DEL TRANSITO, $C_T = \left[\frac{(1+r)^n - 1}{r} \right] 365$							
$n =$ AÑOS DE SERVICIO =							
$T =$ TASA DE CRECIMIENTO ANUAL DEL TRANSITO = %							
$TDPA =$ TRANSITO DIARIO MEDIO ANUAL =							
$\Sigma L = (1) \cdot (8) \cdot (9) \cdot (10)$							



Figura 3.3. GRÁFICA PARA DISEÑO ESTRUCTURAL DE CARRETERAS CON PAVIMENTO FLEXIBLE.

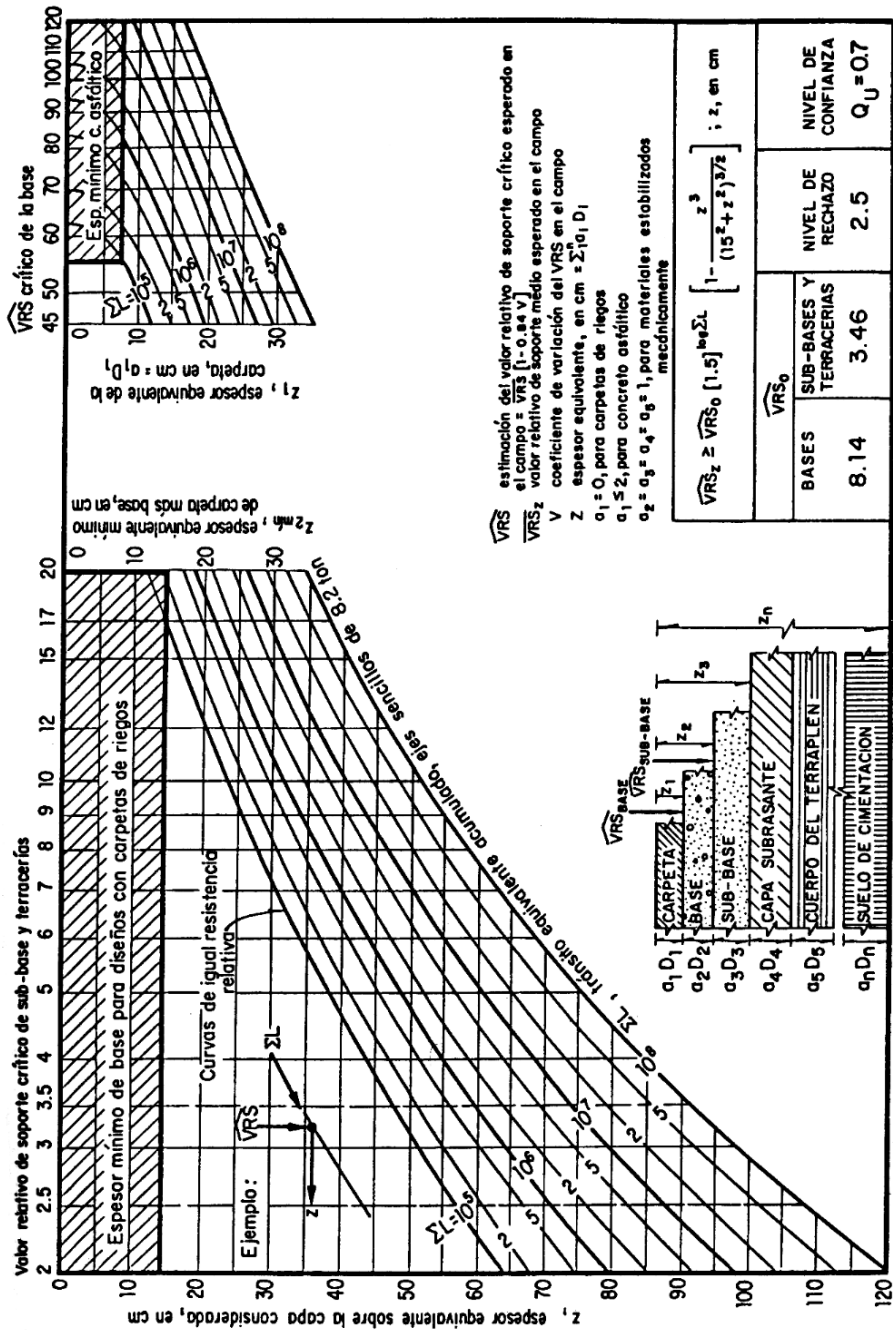




Tabla 3.5. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTO PARA "T 0".

TRÁNSITO	T 0															
SECCIÓN N°		021	022	023	024	025	026	027	031	032	033	034	035	036	037	
CONCRETO VIBRADO	N O						28	28						28	28	
CONCRETO ASFÁLTICO		35	30	30	15	10			35	30	27	15	10			
CONCRETO COMPACTADO	C O N S I D E R A D A S					25							25			
CONCRETO POBRE							15							15		
GRAVA CEMENTO					25			15				22			15	
SUELO CEMENTO				20	20	20					20	20	20			
GRAVA TRITURADA		20	25							25						
GRAVA NATURAL			25				20	20								
SUBRASANTE	E 1	E 2						E 3								

Tabla 3.6. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTO PARA "T 1".

TRÁNSITO	T 1																
SECCIÓN N°		121	122	123	124	125	126	127	131	132	133	134	135	136	137		
CONCRETO VIBRADO	N O						25	25						25	25		
CONCRETO ASFÁLTICO		30	25	25	15	10			30	25	22	15	10				
CONCRETO COMPACTADO	C O N S I D E R A D A S					22							22				
CONCRETO POBRE							15							15			
GRAVA CEMENTO					22			15				20			15		
SUELO CEMENTO				20	20	20					20	20	20				
GRAVA TRITURADA		20	25							25							
GRAVA NATURAL			25				20	20									
SUBRASANTE	E 1	E 2						E 3									



Tabla 3.7. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTO PARA "T 2".

TRÁNSITO	T 2																				
SECCIÓN N°	211	212	213	214	215	216	217	221	222	223	224	225	226	227	231	232	233	234	235	236	237
CONCRETO VIBRADO						23	23						23	23						23	23
CONCRETO ASFÁLTICO	30	25	18	12	8			25	20	18	12	8			25	20	18	12	8		
CONCRETO COMPACTADO					20							20							20		
CONCRETO POBRE						15							15							15	
GRAVA CEMENTO				20			15				20			15				20			15
SUELO CEMENTO			25	20	20					22	20	20					20	15	15		
GRAVA TRITURADA	25	25						20	25							25					
GRAVA NATURAL		25	20	20	20	20	20		25												
SUBRASANTE	E 1						E 2						E 3								

Tabla 3.8. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTO PARA "T 3".

TRÁNSITO	T 3																		
SECCIÓN N°	311	312	313	314	315	316	321	322	323	324	325	326	331	332	333	334	335	336	
CONCRETO VIBRADO						21						21						21	
CONCRETO ASFÁLTICO	20	18	12	6	*		18	15	12	6	*		18	15	12	6	*		
CONCRETO COMPACTADO					20						20						20		
GRAVA CEMENTO				18						18						20	**		
SUELO CEMENTO			25	20	15				22	**	15	15			22				
GRAVA TRITURADA	25	25					25	25						25					
GRAVA NATURAL		25	20			20		25				20							
SUBRASANTE	E 1						E 2						E 3						

TS = Tratamiento superficial mediante riegos con gravilla
 * = TS ó 4 cm de M.B.
 ** = Sólo con subrasante con superficie estabilizada
 Dimensiones en cm



Tabla 3.9. CATÁLOGO DE SECCIONES DE PAVIMENTO PARA "T 4".

TRÁNSITO	T 4																	
SECCIÓN N°	411	412	413	414	415	416	421	422	423	424	425	426	431	432	433	434	435	436
CONCRETO VIBRADO						20						20						20
CONCRETO ASFÁLTICO	5	TS	8	6	*		5	TS	8	6	*		5	TS	8	6	*	
CONCRETO COMPACTADO					20						20						20	
GRAVA CEMENTO				18						18	**					18	**	
SUELO CEMENTO			25	15					22	**					22			
GRAVA TRITURADA	30	30					20	20					30	30				
GRAVA NATURAL	20	25	20		20	20	20	25			20							
SUBRASANTE	E 1						E 2						E 3					

TS = Tratamiento superficial mediante riegos con gravilla
 * = TS ó 4 cm de M.B.
 ** = Sólo con subrasante con superficie estabilizada
 Dimensiones en cm



Figura 3.6. GRÁFICA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE UNA SOLA CAPA (7°C).

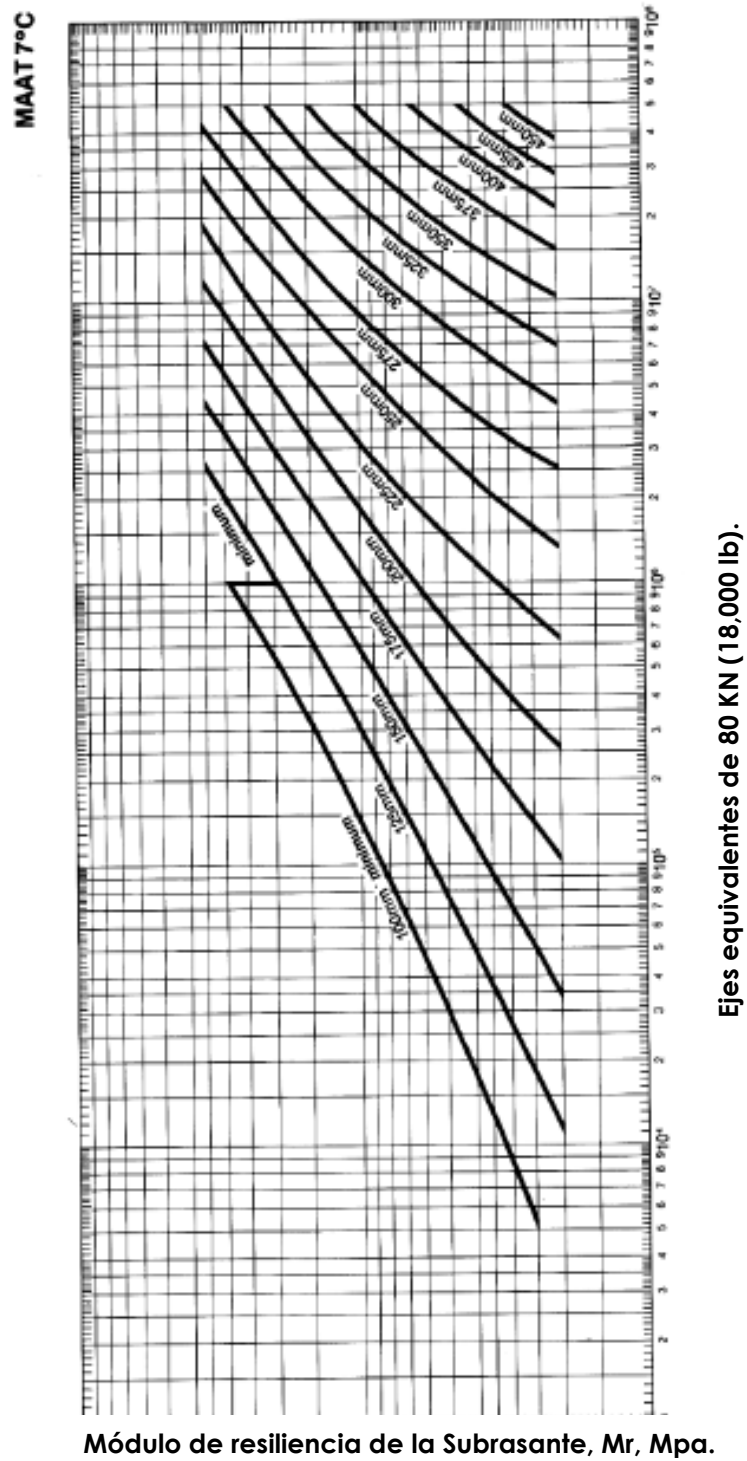




Figura 3.7. GRÁFICA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE UNA SOLA CAPA (15.5°C).

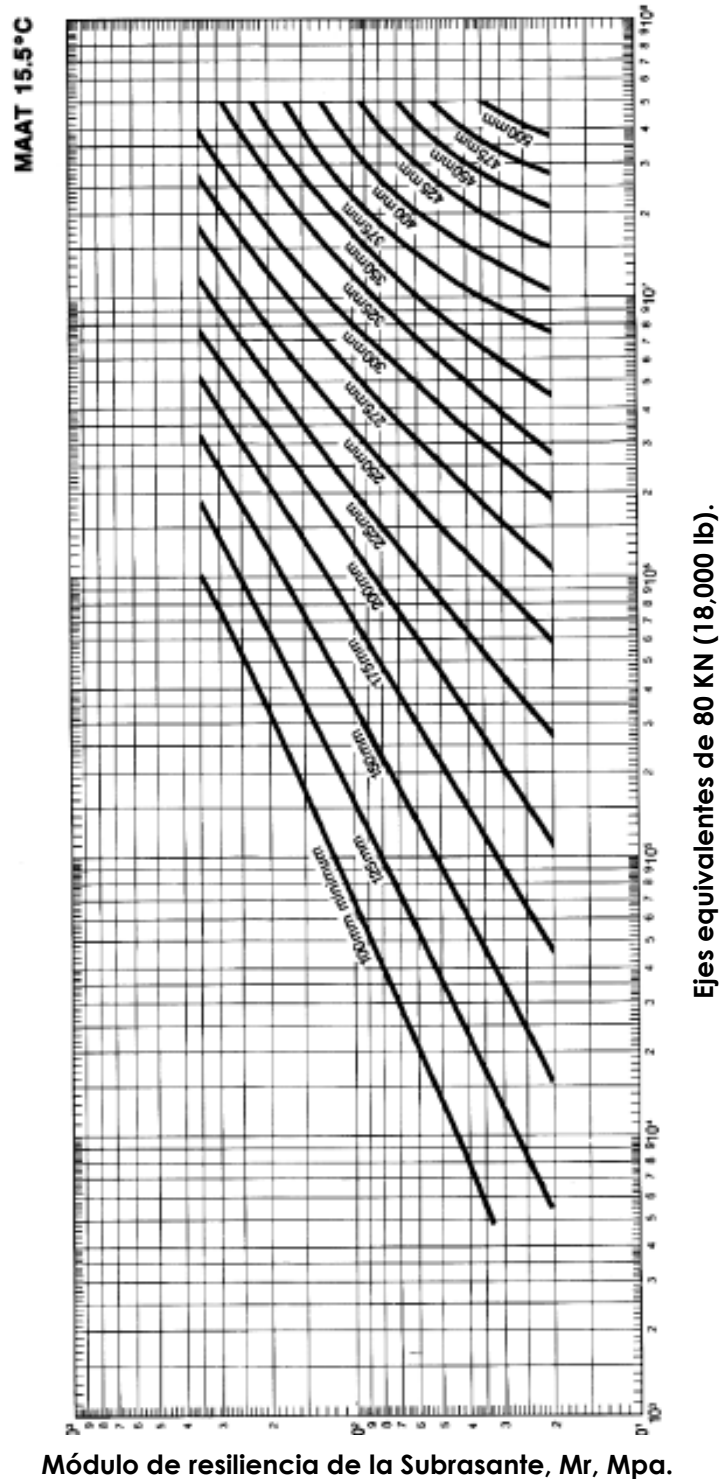




Figura 3.8. GRÁFICA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO DE UNA SOLA CAPA (24°C).

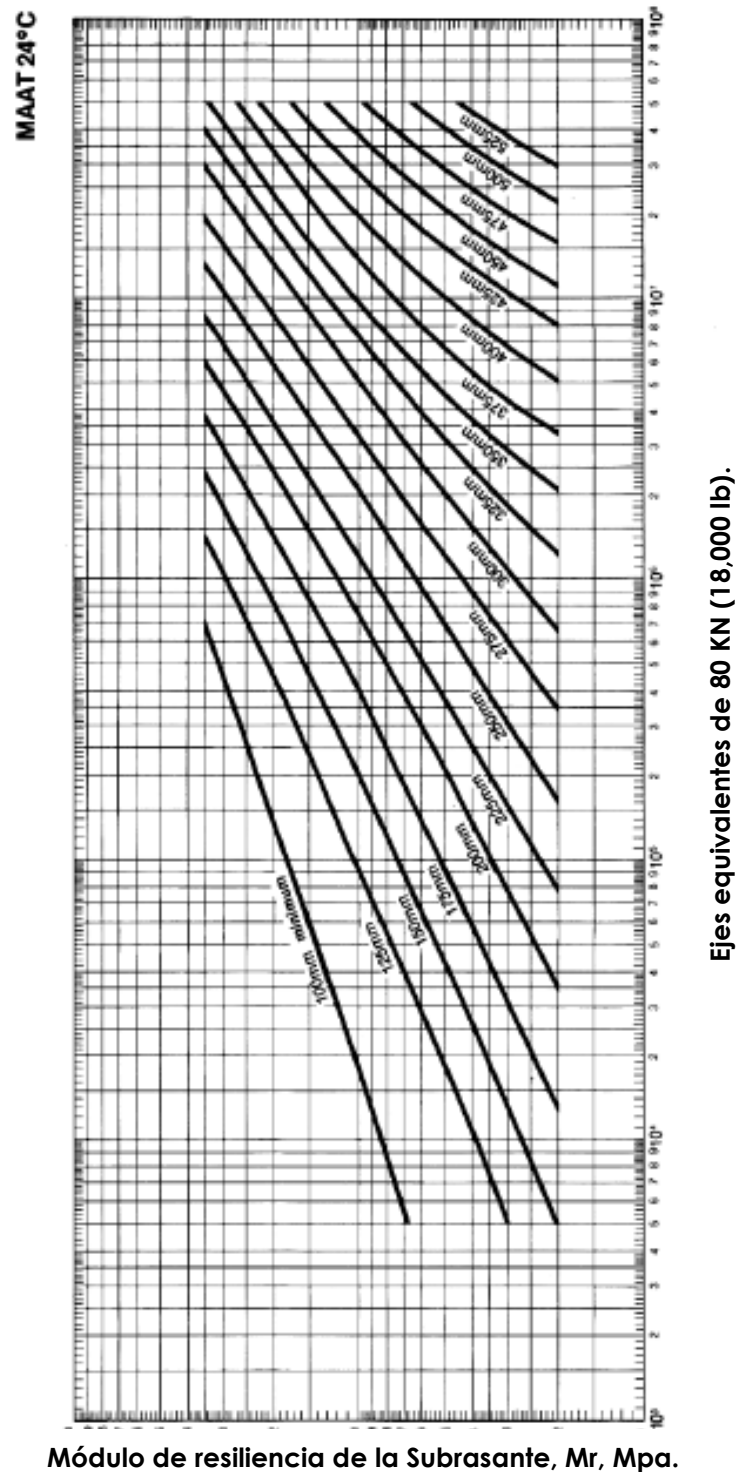




Figura 3.9. GRÁFICA DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE.

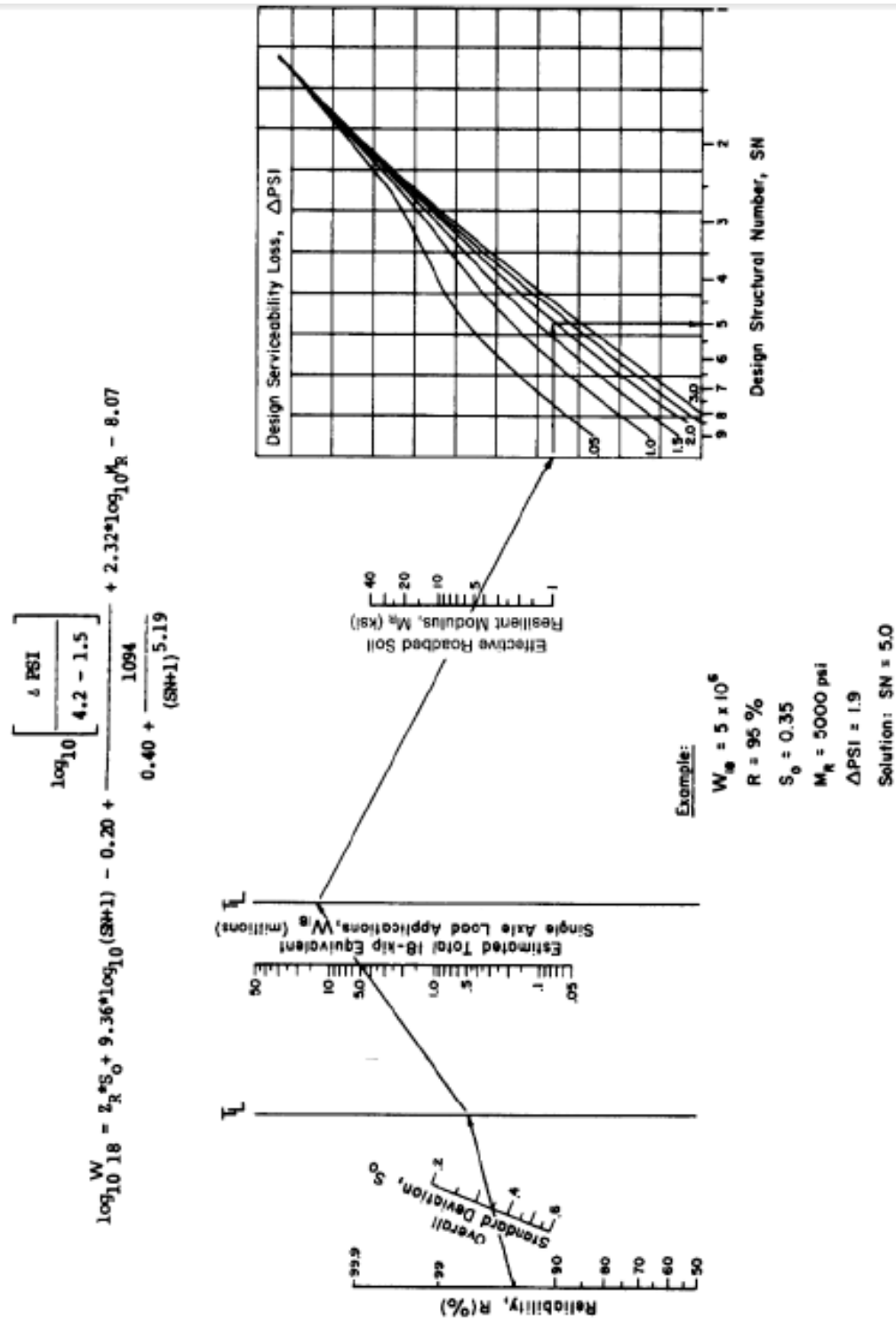
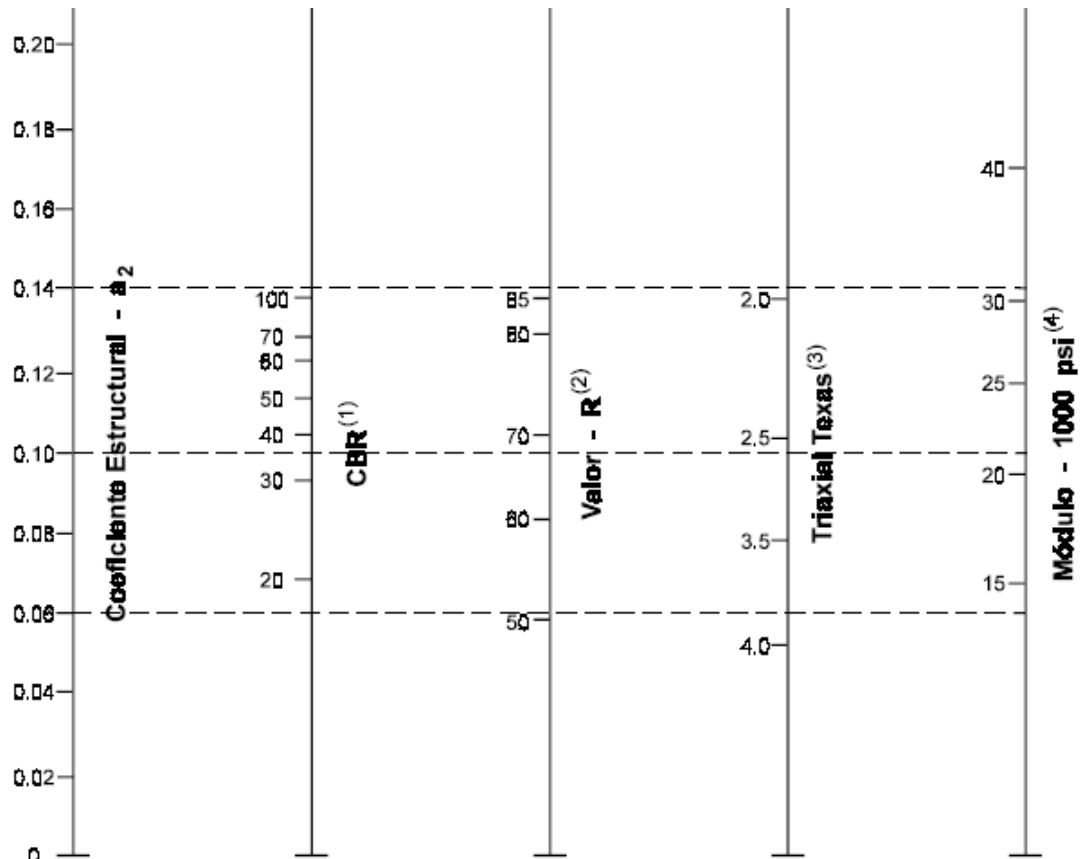




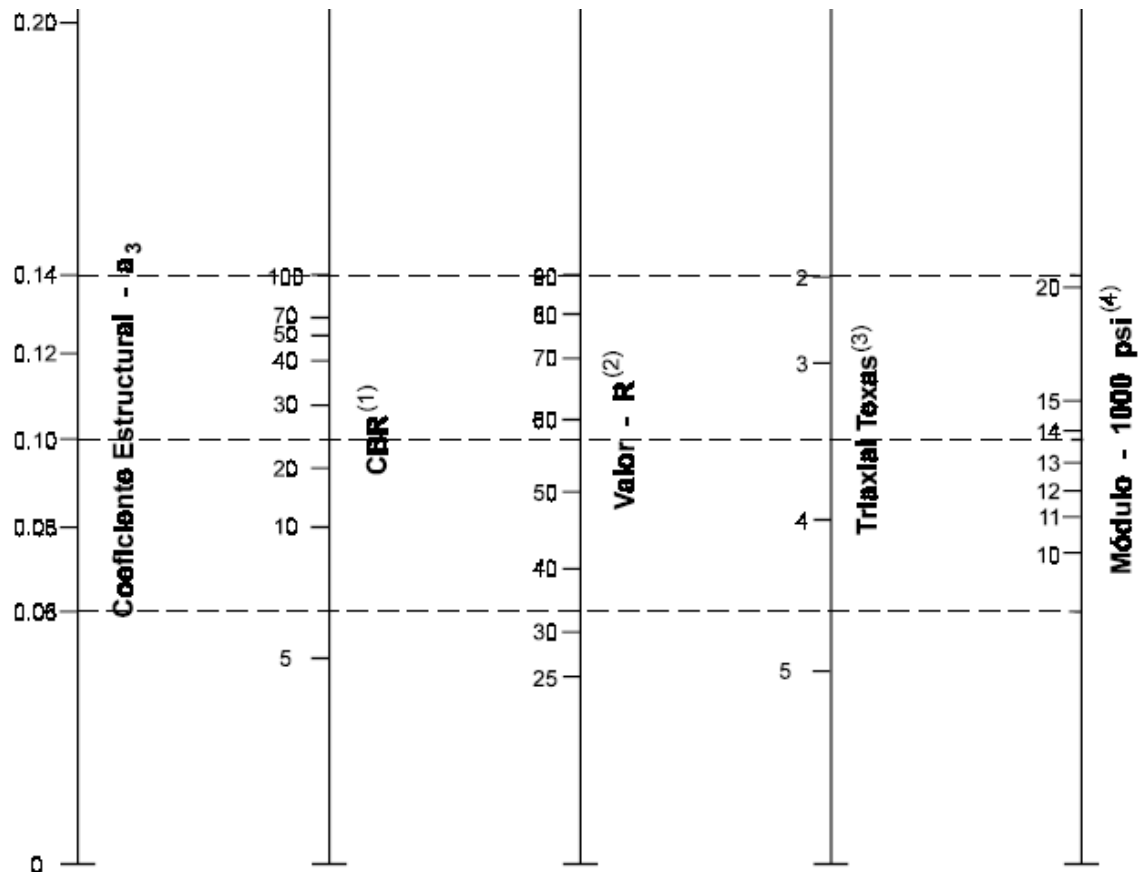
Figura 3.10.- VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CAPA "a2", EN BASES GRANULARES.



- (1) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP



Figura 3.11.- VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CAPA "a3", EN SUBBASES GRANULARES.



(1) Escala derivada de correlaciones de Illinois.

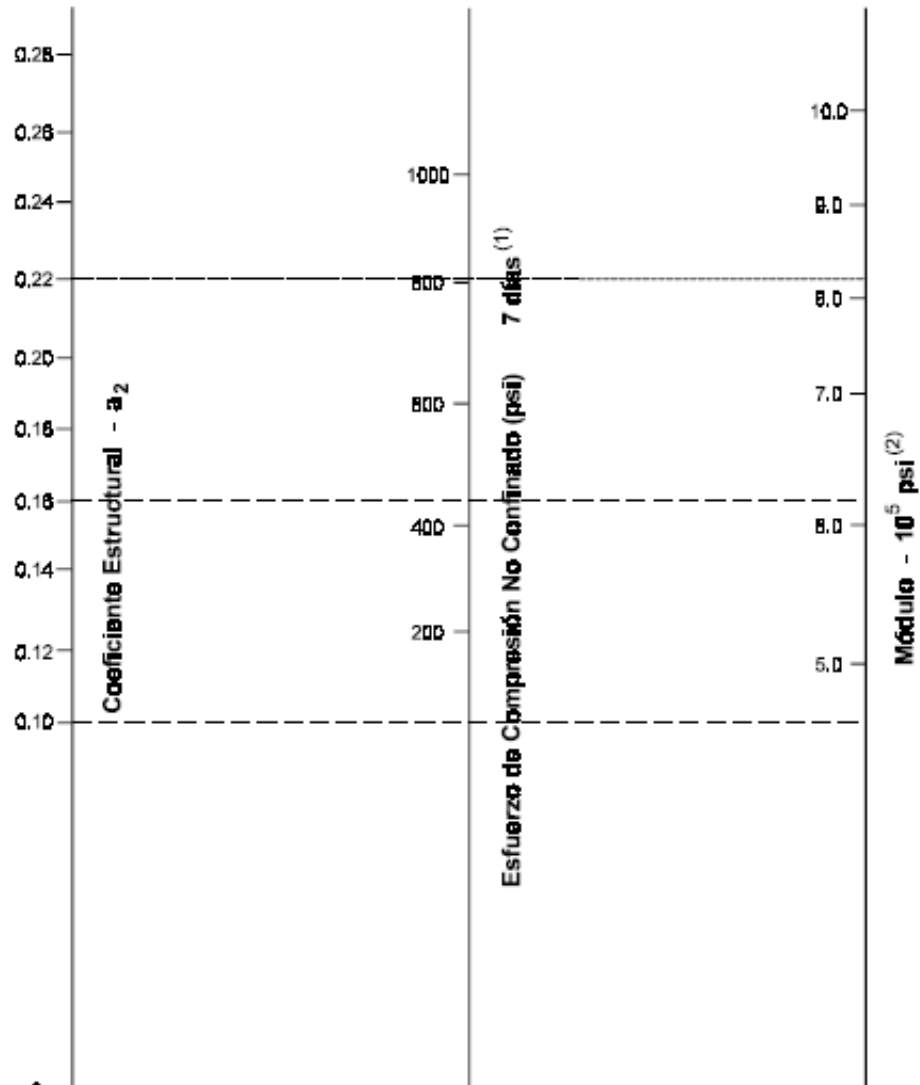
(2) Escala derivada de correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, Nuevo México y Wyoming.

(3) Escala derivada de correlaciones obtenidas de Texas.

(4) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.



Figura 3.12.- VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CAPA "a2", EN BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO PORTLAND.

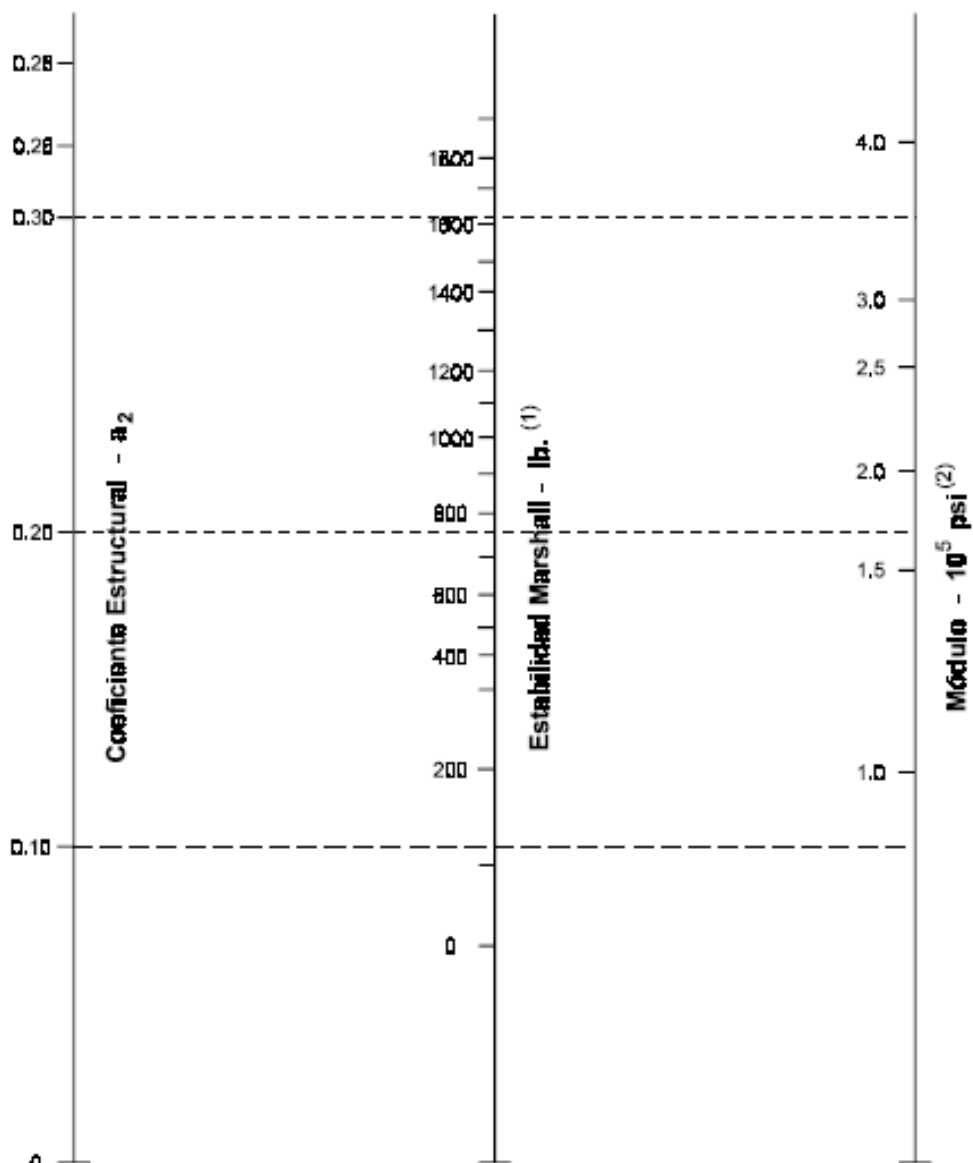


(1) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Illinois, Louisiana y Texas.

(2) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.



Figura 3.13.- VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE CAPA "a2", EN BASES ESTABILIZADAS CON ASFALTO.



(1) Escala derivada por correlación obtenida de Illinois.

(2) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.



Figura 3.14.- FORMATO PARA CALCULAR EL MÓDULO DE RESILIENCIA EFECTIVO DE LA SUBRASANTE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Mes	Módulo de Resiliencia de la Subrasante $M_R(\text{psi})$	Daño Relativo U_f
Ene.		
Feb.		
Mar.		
Abr.		
May.		
Jun.		
Jul.		
Ago.		
Sep.		
Oct.		
Nov.		
Dic.		
Sumatoria:	$\Sigma U_f =$	

