

**DISEÑO Y ELABORACIÓN DE DOCUMENTACIÓN SOPORTE PARA LAS
CLASES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EN EL PROGRAMA DE INGENIERÍA
CIVIL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**



MARYURY PAOLA CAMACHO GRASS

CÓD: 2006157



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2008**

**DISEÑO Y ELABORACIÓN DE DOCUMENTACIÓN SOPORTE PARA LAS
CLASES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EN EL PROGRAMA DE INGENIERÍA
CIVIL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**



MARYURY PAOLA CAMACHO GRASS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

DIRECTOR:

Ing. Ph.D EDUARDO CASTAÑEDA PINZÓN



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2008

DEDICATORIA

*Principalmente a Dios, por sus bendiciones y por la oportunidad que me dio al
abrir esta puerta en mi camino,*

*A mis padres Mariela Grass y Carolipo Camacho,
por su amor, comprensión y por darme
su apoyo en el transcurso del
cumplimiento de esta meta.*

*A mis hermanas, Amanda,
Yuieth y Heidi ,
por su apoyo y confianza.*

*A mis amigos,
por todos los momentos vividos,
los cuales contribuyeron con mi crecimiento personal.*

AGRADECIMIENTO

Agradezco especialmente a mi director de proyecto y maestro el Ing. Ph.D Eduardo Castañeda, por su colaboración y apoyo en todo lo que estuvo a su alcance y sus valiosos comentarios y recomendaciones.

Al cuerpo en general de profesores, por compartir sus valiosos conocimientos y experiencias, que contribuyeron con mi proceso de formación tanto integral como intelectual, para mi futuro desarrollo profesional

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	2
1.1. HISTORIA DE LOS PAVIMENTOS.....	2
1.2. TIPOS DE PAVIMENTOS	5
1.2.1. Pavimento flexible.....	5
1.2.2. Pavimento de capa asfáltica gruesa.....	9
1.2.3. Pavimentos Rígidos.....	10
1.2.4. Pavimento Semi-rígido.....	12
1.2.5. Pavimento Articulado.....	13
1.2.6. Pavimento compuesto.....	15
1.2.7. Pavimento de estructura inversa.....	16
2. LA FUNDACIÓN DE UN PAVIMENTO O SUBRASANTE	18
2.1. ANÁLISIS PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DE UN SUELO PARA SUBRASANTE.....	19
2.2. ESTABILIZACIÓN O MEJORAMIENTO DEL MATERIAL.....	37
3. MATERIALES PARA CAPAS DE PAVIMENTOS	43
3.1. MATERIALES PARTICULADOS.....	43
3.1.1. Propiedades generales de las capas granulares.....	44
3.2. BASES ESTABILIZADAS.....	54
3.2.1. Estabilización de bases con cemento portland.....	54
3.2.2. Estabilización de bases con emulsión asfáltica.....	56
3.3. LIGANTES ASFÁLTICOS.....	61
3.3.1. Asfaltos.....	62
3.3.2. Propiedades de los ligantes asfálticos.....	65
3.3.3. Tipos de ligantes asfálticos.....	70
3.3.4. Usos de los productos bituminosos en la construcción de pavimentos.....	82
3.4. MEZCLAS BITUMINOSAS.....	86

3.4.1.	Mezcla abierta en frío	86
3.4.2.	Mezcla densa en frío	88
3.4.3.	Lechada asfáltica	89
3.4.4.	Mezcla densa en caliente	92
3.5.	CONCRETO HIDRÁULICO	104
3.5.1.	Materiales que componen el concreto hidráulico	104
4.	DIMENSIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	111
4.1.	TRANSITO	111
4.1.1.	Definiciones	112
4.1.2.	Clasificación de los vehículos	115
4.1.3.	La Carga de Diseño	119
4.2.	MÉTODOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	127
4.2.1.	Métodos empíricos	127
4.2.2.	Método Mecanístico	159
5.	DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS	190
5.1.	MÉTODO EMPÍRICO	190
5.1.1.	Método AASHTO 1993	191
5.1.2.	Método de la pórtland cement association (PCA)	209
5.2.	JUNTAS EN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS	230
5.2.1.	Consideraciones para el diseño de juntas	231
5.2.2.	Tipos de juntas	233
5.2.3.	Factores que contribuyen a la transferencia de carga	237
5.2.4.	Sellado de juntas	240
6.	MANTENIMIENTO DE LOS PAVIMENTOS	244
6.1.	INVENTARIO DE DAÑOS.....	245
6.1.1.	Patologías de pavimentos flexible	245
6.1.2.	Patologías de pavimentos rígidos	277
6.2.	REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO.....	306
6.2.1.	Equipos para medir la regularidad superficial del pavimento	306
6.2.2.	Índice de rugosidad internacional o índice de regularidad internacional (IRI)	309
6.3.	RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO.....	309
6.3.1.	Equipos para medir la resistencia al deslizamiento	310
6.3.2.	Índice de fricción internacional (IFI)	315
6.4.	AUSCULTACIÓN ESTRUCTURAL.....	317
6.4.1.	Equipos empleados para la auscultación de pavimentos	318
6.4.	DIMENSIONAMIENTO DE CAPAS DE REFUERZO.	324
6.4.1.	Método basado en la deflexión Benkelman	324
6.4.2.	Método (AASHTO-93)	326

CONCLUSIONES 336

BIBLIOGRAFÍA 337

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Ejemplo de algunas capas de materiales encontrados al excavar un pavimento	2
Figura 2. Estructura de pavimentos flexible	6
Figura 3. Estructura de pavimento de capa asfáltica gruesa	9
Figura 4. Estructura de pavimento rígido	10
Figura 5. Fenómeno de bombeo.....	11
Figura 6. Estructura de capas de un pavimento semi-rígido.....	12
Figura 7. Estructura de pavimentos articulado.....	13
Figura 8. Estructura de capas de pavimento compuesto.....	16
Figura 9. Pavimento de estructura inversa	17
Figura 10. Plano de zonas geológicas atravesadas por una carretera	19
Figura 11. Ensayo de prueba de placa	26
Figura 12. Representación del círculo de Mohr	27
Figura 13. Máquina usada para el ensayo triaxial.....	29
Figura 14. Mecanismo de deformación permanente en los pavimentos.....	30
Figura 15. Módulo efectivo de Resiliencia de la subrasante para pavimentos flexibles en función del criterio de serviciabilidad.....	33
Figura 16. Estabilización con geotextiles	39
Figura 17. Estabilización con cal (Distribución de la Cal)	40
Figura 18. Estabilización con cemento portland.....	41
Figura 19. Estabilización con productos asfálticos.....	42
Figura 20. Algunos materiales particulados	43
Figura 21. Ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles.	45

Figura 22. Ensayo de desgaste micro-Deval	45
Figura 23. Ensayo de Sanidad en sulfato	46
Figura 24. Ensayo de resistencia al pulimiento	47
Figura 25. Franjas granulométricas del material de afirmado	50
Figura 26. Proceso industrial para refinar el petróleo	62
Figura 27. Composición química de los asfaltos	63
Figura 28. Ensayo de penetración	74
Figura 29. Eje sencillo de rueda sencilla	112
Figura 30. Sencillo de rueda doble	112
Figura 31. Eje tándem	113
Figura 32. Eje tridem	113
Figura 33. Algunos vehículos livianos	114
Figura 34. Ejemplo de circuito usado en la prueba AASHO	129
Figura 35. Gráfica para hallar el coeficiente a_1 en función del módulo resiliente del concreto asfáltico	137
Figura 36. Variación de coeficiente a_2 con deferente parámetros de resistencia de la base granular	138
Figura 37. Variación de a_2 en bases tratadas con cemento para diferentes parámetros de resistencia	139
Figura 38. Variación de a_2 en bases tratadas con asfalto para diferentes parámetros de resistencia	140
Figura 39. Variación del coeficiente a_3 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase	141
Figura 40. Factor tiempo para drenaje en una capa saturada	143
Figura 41. Factor tiempo para 50% de drenaje	144
Figura 42. Gráfica de diseño para pavimentos flexibles basada en valores promedio de los diferentes datos de entrada	149
Figura 43. Determinación de los espesores de las capas mediante aproximaciones	152

Figura 44. Metodología general para el diseño de pavimentos según el método mecanístico.....	161
Figura 45. Modelo de Boussinesq para los esfuerzos actuantes sobre elementos.	167
Figura 46. Multicapa propuesto con la formula de Palmer y Barber generalizada.	171
Figura 47. Multicapa propuesto con al formula de Odemark.	173
Figura 48. Esfuerzo vertical en un multicapa con las formulas de Odemark y Kira	175
Figura 49. Carga en el interior de la placa.	176
Figura 50. Carga en el borde de la junta.....	177
Figura 51. Carga repartida en dos cargas sin transferencia de carga	179
Figura 52. Carga en la esquina de la placa.	180
Figura 53. Esfuerzo horizontales en un modelo bicapa con las fórmulas de Lister y Jones	181
Figura 54. Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita.....	200
Figura 55. Nomograma para determinar el deterioro relativo, (U_f).....	200
Figura 56. Nomograma de diseño para pavimentos rígidos	206
Figura 57. Relaciones aproximada ente los valores de resistencia y clasificación del suelo	213
Figura 58. Porcentaje de vehículos comerciales en el carril derecho de una carretera de carriles múltiples (con separador central).	216
Figura 59. Análisis de fatiga-Repetición de carga admisible con base en el factor de relación de esfuerzos (con y sin bermas de concreto.).....	221
Figura 60. Repetición de carga admisible con base en el factor de erosión (sin bermas de concreto)	223
Figura 61. Repetición de carga admisible con base en el factor de erosión (con bermas de concreto)	225
Figura 62. Juntas transversales con y sin pasajuntas.....	234

Figura 63. Junta longitudinal	236
Figura 64. Secciones endientadas para juntas longitudinales	236
Figura 65. Junta de dilatación	237
Figura 66. Ejemplo del sello de una junta	243
Figura 67. Fisura longitudinal.....	246
Figura 68. Fisura transversal	246
Figura 69. Fisura en medialuna.	248
Figura 70. Fisura piel de cocodrilo	249
Figura 71. Fisuras en bloque	251
Figura 72. Fisura por deslizamientos de capas.....	253
Figura 73. Fisura de borde.....	254
Figura 74. Fisura longitudinal de construcción.....	255
Figura 75 . Fisura transversal en juntas de construcción.....	255
Figura 76. Fisura por reflexión de la junta.....	256
Figura 77. Abultamiento.....	258
Figura 78. Hundimientos.....	259
Figura 79. Ahuellamientos	261
Figura 80. Ondulación.....	262
Figura 81. Descascaramiento	264
Figura 82. Baches.....	265
Figura 83. Desprendimiento tipo cabeza dura.	266
Figura 84. Exudación del asfalto.....	267
Figura 85. Desgaste superficial.....	269
Figura 86. Surcos.....	270
Figura 87. Perdida de agregados.....	271
Figura 88. Desprendimiento de borde.....	273
Figura 89. Parcheo	274
Figura 90. Afloramiento de agua.....	276
Figura 91. Corrimiento de la berma.	276
Figura 92. Deficiencia en el material de sello	278

Figura 93. Separación de juntas longitudinales	280
Figura 94. Desportillamientos de juntas	281
Figura 95. Grieta de esquina.....	283
Figura 96. Grieta longitudinal	284
Figura 97. Grieta transversal.....	285
Figura 98. Grieta en bloque o fracción múltiple.....	287
Figura 99. Grieta en pozo y sumideros	288
Figura 100. Desintegración.....	289
Figura 101. Descascaramiento.	290
Figura 102. Bache.....	292
Figura 103. Pulimiento.	293
Figura 104. Parches.....	295
Figura 105. Levantamiento de losa.....	296
Figura 106. Escalonamiento de juntas y grietas	298
Figura 107. Hundimiento.....	299
Figura 108. Descenso de la berma.	300
Figura 109. Separación entre la berma y el pavimento.....	302
Figura 110. Bombeo de finos sobre las juntas transversales y longitudinales	303
Figura 111. Fisuras ligeras de aparición temprana	304
Figura 112. Fisuras por durabilidad	305
Figura 113. Viágrafo	307
Figura 114. Equipo (Scrim) de medida del rozamiento transversal.....	308
Figura 115. British Pendulun.....	311
Figura 116. Scrim (rueda oblicua).....	313
Figura 117. Grip tester	314
Figura 118. Círculo de arena ASTM E-965.....	314
Figura 119. Drenómetro.....	315
Figura 120. Viga Benkelman.....	319
Figura 121. Deflectógrafo Iacrix.	320
Figura 122. Deflectómetro de impacto de 150 kN.....	321

Figura 123. Viógrafo	322
Figura 124. Perfilómetro pivotante (Dipstick)	323
Figura 125. Perfilómetro pivotante (DS 2000).....	323
Figura 126. Relación de pérdida de factor de condición y pérdida de vida	329

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de Carga Unitaria.....	25
Tabla 2. Módulo resiliente de diseño para subrasante.....	35
Tabla 3. Franjas granulométricas del material de subbase.....	51
Tabla 4. Franjas de granulométrica del material de base granular.	52
Tabla 5. Requisitos de los materiales para afirmados, subbases granulares y bases granulares	53
Tabla 6. Requisitos de los materiales para la construcción de bases estabilizadas con cemento Portland.	54
Tabla 7. Requisitos granulométricos del material para la construcción de bases estabilizadas con cemento Portland	55
Tabla 8. Requisitos químicos del cemento Portland	55
Tabla 9. Requisitos físicas del cemento Portland	56
Tabla 10. Gradaciones de agregados para construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica.....	57
Tabla 11. Requerimientos de los agregados pétreos para la construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica.	58
Tabla 12. Requisitos de los suelos aptos para la construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica	59
Tabla 13. Gradación de suelos para la construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica	60
Tabla 14. Ensayo de viscosidad	76
Tabla 15. Clasificación de asfaltos Mexicanos.....	76
Tabla 16. Equipos y propósito de la prueba superpave	77

Tabla 17. Grado de ligante de Superpave	79
Tabla 18. Especificaciones de asfaltos líquidos para riegos de imprimación.....	83
Tabla 19. Granulometría de la mezcla en frío	86
Tabla 20. Especificaciones para emulsiones catiónicas	87
Tabla 21. Granulometría para diferentes tipos de mezclas densas en frío	88
Tabla 22. Tipos de mezcla por utilizar en función del tipo y espesor compacto de la capa.....	89
Tabla 23. Granulometría de las lechadas asfálticas	90
Tabla 24. Especificaciones para emulsiones asfálticas modificadas con polímeros	90
Tabla 25. Composición de las lechadas asfálticas.....	91
Tabla 26. Criterios para el diseño de lechadas asfálticas	92
Tabla 27. Gradación de la mezcla de agregados.....	93
Tabla 28. Tipo de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente	94
Tabla 29. Especificaciones del cemento asfáltico.....	95
Tabla 30. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall	96
Tabla 31. Especificaciones de cementos asfálticos modificados con polímeros...97	
Tabla 32. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas (Nivel de tránsito NT1).....	98
Tabla 33. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas (Nivel de tránsito NT2).....	100
Tabla 34. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas (Nivel de tránsito NT3).....	102
Tabla 35. Granulometría para el agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico	105
Tabla 36. Requisitos de agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico .	105
Tabla 37. Granulometría para agregado grueso para mezcla de concreto.....	107
Tabla 38. Requisitos de agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico	107

Tabla 39. Requisitos para el agua de mezcla	109
Tabla 40. Clasificación de los vehículos en Colombia según ICONTEC	116
Tabla 41. Factores de equivalencia de carga para diferentes tipos de vehículos	120
Tabla 42. Factor de distribución por carril (DC) según el manual de diseño de pavimento asfálticos en vías con medio y altos volúmenes de tránsito del INVIAS y el método AASHTO 2002	121
Tabla 43. Cargas de referencia adoptadas por el Instituto Nacional de Vías para el diseño de pavimentos asfálticos	123
Tabla 44. Periodos de diseño en función del tipo de carretera	131
Tabla 45. Valores de “R” de confiabilidad	131
Tabla 46. Nivel de serviciabilidad.....	134
Tabla 47. Tiempo de drenaje para capas granulares.....	142
Tabla 48. Coeficiente de drenaje para pavimentos flexibles m_i	145
Tabla 49. Valor de desviación estándar Z_R para un determinado porcentaje de confiabilidad	147
Tabla 50. Espesores mínimos, en pulgadas, en función de los ejes equivalentes.	151
Tabla 51. Criterios de deformación utilizados por diversas Instituciones.....	185
Tabla 52. Factor carril	195
Tabla 53. Valor de transferencia de carga “J”	195
Tabla 54. Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad E_c	197
Tabla 55. Valores del factor de pérdida de soporte L_s , por el tipo de subbase o base	198
Tabla 56. Coeficientes de drenaje para pavimentos rígidos (C_d).....	201
Tabla 57. Confiabilidad recomendada por AASHTO.....	203
Tabla 58 Factor de Seguridad AASHTO	203
Tabla 59. Efecto de la subbase granular sobre el valor de K	214
Tabla 60. Valores de diseño par subbase tratada con cemento	214

Tabla 61. Tasas anuales de crecimiento de tránsito y sus correspondientes factores de proyección.....	215
Tabla 62. Formato para el cálculo de espesor del pavimento.....	219
Tabla 63. Esfuerzo equivalente sin berma de concreto (eje sencillo, tándem y tridem).....	220
Tabla 64. Esfuerzo equivalente con berma de concreto (eje simple, tándem y tridem).....	220
Tabla 65. Factor de erosión juntas con pasadores sin bermas en concreto (eje simple, tándem y tridem).....	222
Tabla 66. Factor de erosión. Trabazón de agregados, sin bermas de concreto (eje sencillo, tándem y tridem).....	222
Tabla 67. Factores de erosión –juntas con pasadores- bermas de concreto (eje sencillo, tándem y tridem).....	224
Tabla 68. Factores de erosión – trabazón de agregados, bermas de concreto (eje simple, tándem y tridem).....	224
Tabla 69. Requisitos para el material de sello de juntas en pavimento de concreto hidráulico	241
Tabla 70. Nivel de severidad de los baches	266

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y ELABORACIÓN DE DOCUMENTACIÓN SOPORTE PARA LAS CLASES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EN EL PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.*

AUTOR:
MARYURY PAOLA CAMACHO GRASS**

PALABRAS CLAVES:
Pavimentos, base, subbase, subrasante, asfalto, mantenimiento, esfuerzos, deformaciones.

DESCRIPCIÓN:

Este documento se desarrollo con el propósito de contribuir al proceso de enseñanza-aprendizaje de los estudiantes de la asignatura de “Diseño de Pavimentos” la cual esta incluida en el plan de estudios de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, su contenido es una recopilación bibliográfica de los diversos temas necesarios para su comprensión y análisis.

A su vez el proyecto se desarrollo teniendo en cuenta los siguientes parámetros que facilitaron la construcción de su contenido: como primer paso se analizaron las notas tomadas en la clase, posteriormente se realizo una recolección y discriminación de información, luego se hizo la respectiva lectura y análisis de dicha información y por ultimo se culmino el proceso de creación del libro con su redacción y revisiones periódicas por parte del director del proyecto.

Su contenido comprende diversos temas que abarcan lo establecido en el programa de la asignatura, entre los cuales están: historia, definiciones y características de los diversos tipos de pavimentos, propiedades de las distintas capas que forman la estructura, descripción de la fundación, análisis de los métodos más comunes para su dimensionamiento entre los cuales se presentan

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería civil, Director. Ing. Eduardo Castañeda Pinzón.

las opciones de los métodos tradicionales y los mecanísticos, características de los distintos materiales empleados en la construcción de un pavimento, los posibles deterioros que pueden presentarse y mantenimientos.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND PREPARATION OF SUPPORTING DOCUMENTATION FOR PAVEMENT DESIGN CLASS ON THE AGENDA OF CIVIL ENGINEERING AT THE UNIVERSITY INDUSTRIAL DE SANTANDER*

AUTHOR:
MARYURY PAOLA CAMACHO GRASS**

KEYWORDS:
Pavements, basis, Subbase, subgrade, asphalt, maintenance, stress, deformations.

DESCRIPTION:

This document was developed with the objective of contributing to the teaching-learning process for students of the subject "Pavements Design," which is included in the curriculum of Civil Engineering of the Industrial University of Santander, its content is a bibliographic compilation of various items needed for their understanding and analysis.

This Project was developed taking into account the next parameters which made it's contents construction easier: as a first step, class notes were analyzed, later on, a recompilation and discrimination of the information was made, then the respective reading and analysis of such information was made and finally, the process of creating the book was finished with periodical reviews by project's director.

Its content includes a variety of topics which includes what is established in the subject's program, among which are: history, definitions and characteristics of various types of pavement, properties of different layers which form the structure, description of the foundation, analysis of the most common methods for sizing among which are the options of traditional methods and mechanistic methods, characteristics of different materials used in building a pavement, the potential damage that may occur and maintenance.

* Grade Project

** Physical- Mechanical Engineering's Faculty, Civil Engineering School, Director: Castañeda Pinzón , Eduardo

INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de los pavimentos en el mundo, la red vial del país se ha visto obligada a enfrentar cambios en los cuales se permita alcanzar la máxima eficiencia en el diseño de pavimentos, mejorando las propiedades de su estructura y los diferentes procesos constructivos de la misma.; situación que debe valorarse desde la etapa de formación de los futuros ingenieros civiles y afines.

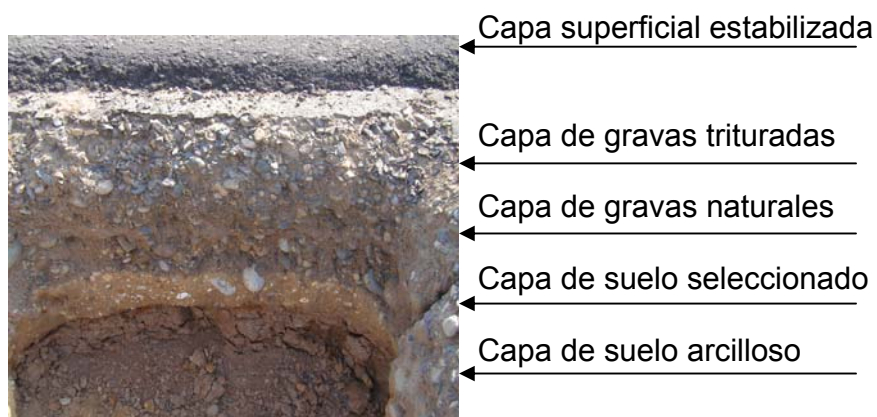
Lo anterior genera la necesidad de crear un documento que recopile información bibliográfica relevante, tal como se evidencia en el presente trabajo, el cual tiene como propósito ayudar al estudiante en el desarrollo de los objetivos establecidos para la asignatura “Diseño de Pavimentos”, brindando una herramienta que puede ser usada dentro de los procesos de enseñanza-aprendizaje, gracias a que su contenido esta expresado de forma clara y sencilla que facilita su comprensión.

El texto esta estructurado según el programa establecido para la asignatura de Diseño de Pavimentos de la Universidad Industrial de Santander, el cual contiene cinco capítulos que comprenden los diferentes temas relacionados con pavimentos; en los que se trata inicialmente su historia, descripción, materiales, métodos de dimensionamiento de las capas, mantenimiento y calculo de esfuerzos y deformaciones de los diferentes tipos de pavimentos.

1. GENERALIDADES

Se denomina pavimento a la estructura constituida por capas de materiales cuya función es permitir la operación rápida, cómoda y segura de los vehículos en una carretera.

Figura 1. Ejemplo de algunas capas de materiales encontrados al excavar un pavimento



1.1. HISTORIA DE LOS PAVIMENTOS

Por siglos el hombre ha buscado mejorar sus condiciones de vida, transformado su medio ambiente a escenarios más apropiados y acordes a sus necesidades cada día más exigentes. El crecimiento de la población, las necesidades de comunicación, los crecientes procesos de comercialización son algunas de las situaciones que motivaron a las antiguas y actuales civilizaciones a idear medios

que facilitarán el transporte de mercancías y el traslado de una población a otra de manera rápida y eficiente, contribuyendo así con el desarrollo tanto económico como social de sus comunidades. De esta manera es como se da inicio a la construcción de lo que hoy conocemos como vías o carreteras.

La historia de los pavimentos es tan antigua como el hombre mismo, se remonta a los tiempos del imperio hitita, primero en usar losas de piedra como pavimento a partir del año 600 a. de C., año en que se construyó la avenida procesional Aibur-Shabu de Babilonia. La base del firme constaba de varias hiladas de bloques de terracota unidos por asfalto natural. Como pavimento se empleaban losas de piedra caliza achaflanadas en su parte inferior, cuyas juntas estaban también selladas con asfalto natural. Este tipo de pavimento era muy similar al usado en la isla de Creta donde los pavimentos estaban formados por adoquines de basalto asentados sobre capas de arcillas, piedras y yeso.

Las vías griegas eran de carácter normalmente religioso y disponían de unas hendiduras en las losas de piedra que servían de guía a las ruedas de los carros. En Egipto para la construcción de las pirámides fue necesario construir caminos que además de tener una gran resistencia para el transporte de los materiales, presentaban un aspecto liso e indeformable, por esta razón los griegos usaron losas de piedra toscamente labradas asentadas sobre terreno firme.

Uno de los sistemas de comunicación más perfecto fue el construido en el imperio romano el cual se caracterizó por sus grandes detalles técnicos y por la funcionalidad de sus vías. Para su construcción, se efectuaba una excavación de tierras hasta encontrar una capa dura de cimentación sobre la que se preparaba un lecho formado por arillas y bolos o gravas de gran tamaño (statumen). Encima de esta capa se extendía otra de hormigón de cal (rudus) y en otros casos, piedra machacada con materiales sueltos de grano fino (nucleus) para colocar sobre ésta, a modo de pavimento y con el máximo cuidado, losas o lajas de piedra

(summa crusta). Las vías de menor importancia eran construidas con firmes de menor calidad, que constaba de una base formada por grandes bolos y materiales sueltos de grano fino y a veces cemento rudimentario de puzolanas. Todos y cada uno de los firmes construidos para finalizar eran recubiertos por un enlosado el cual realizaba las funciones que actualmente hace un pavimento, esto se hacía con el propósito de dar una mayor comodidad en el servicio para el tráfico lento de animales y carros y mejorar las condiciones higiénicas. El material básico utilizado en la mayoría de los casos era la zahorra natural, de granulometría muy variada.

La caída del Imperio Romano generó su segregación en pequeñas naciones, a la vez que desaparecieron la mayor parte de las vías de comunicación entre los pueblos. Las órdenes religiosas recuperaron estas rutas a través de los caminos peregrinos en España, Francia y demás países europeos, mientras que los señores feudales se encargaban de la conservación y mejora de los caminos más cercanos.

En la Edad Media, era frecuente la pavimentación con losas de piedra similares características y dimensiones, así como el empleo de piedras de tamaño más reducido a modo de pavimento (empedrados) para el tránsito de caballerías y ganados.

Más adelante a finales del siglo XVIII y principios del XIX se comenzaron a pavimentar calles utilizando alquitrán en riegos. Posteriormente, en Estados Unidos se emplearon mezclas fabricadas a partir de rocas asfálticas y de asfaltos naturales. Fue el norteamericano Richardson quien estableció las bases a partir de las cuales se consolidó la utilización de los betunes asfálticos para la fabricación de mezclas asfálticas, que actualmente resultan básicas para la pavimentación.

A mediados del siglo XX, en las vías urbanas se comenzaron a cubrir los antiguos pavimentos de piedra con capas de mezcla asfálticas para resistir cargas pesadas,

con el fin de disminuir los daños ocasionados por el aumento del volumen de tráfico, con tal de atenuar su rodadura incómoda y ruidosa, su excesivo deslizamiento y su elevado costo de conservación.

1.2. TIPOS DE PAVIMENTOS

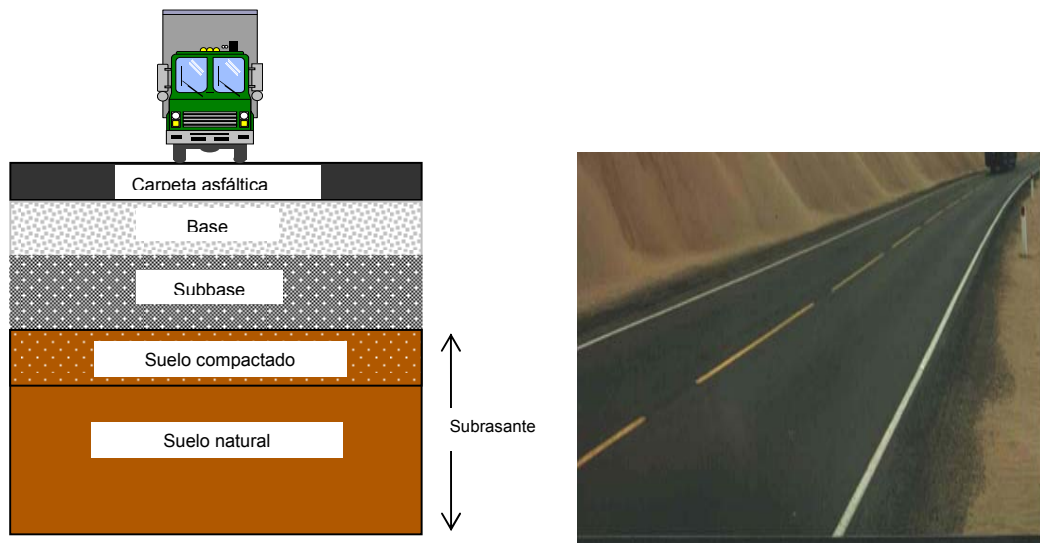
Los tipos de pavimentos mas conocidos en el medio son:

- ❖ Pavimento flexible
- ❖ Pavimento de capa asfáltica gruesa
- ❖ Pavimento rígido
- ❖ Pavimento semi-rígido
- ❖ Pavimento articulado
- ❖ Pavimento compuesto
- ❖ Pavimento de estructura inversa

1.2.1. Pavimento flexible

Este tipo de pavimentos esta conformado por una delgada capa superficial construida sobre una o dos capas de material granular, denominadas base y subbase, las cuales se asientan sobre un suelo o capa denominada subrasante. La capa superficial está constituida por agregados pétreos tratados con ligantes bituminosos. Se le denomina pavimento flexible debido a las características viscoelásticas del bitumen, ya que las cargas producen deformaciones más altas en comparación con otros tipos de pavimentos.

Figura 2. Estructura de pavimentos flexible



La fundación del pavimento o subrasante.

Después de realizar las explanaciones para la construcción de una carretera, los materiales naturales que quedan expuestos en los cortes o en la parte superior de los terraplenes, no tienen capacidad mecánica suficiente para soportar las cargas de los vehículos. Para aumentar su resistencia se compacta un espesor de suelo del orden de 20 cm, antes de colocar las capas del pavimento y el conjunto suelo natural-capas de suelo compactado conforman el cimiento o subrasante del pavimento.

La Base y la Subbase

La capa de base es la porción de la estructura de pavimento flexible inmediatamente debajo de la capa superficial. La función fundamental de esta capa es proporcionar un elemento resistente que atenúe los esfuerzos producidos por las cargas de tránsito para transmitirlos a la subrasante. La base comúnmente consta de agregados como piedra triturada, escoria triturada o grava triturada o sin triturar y arena, o la combinación de estos materiales. Como la parte inferior de esta capa va a estar sometida a menores esfuerzos, es posible reducir las características de resistencia mecánica del material en esta porción y transformarla en dos capas, la superior o capa de base propiamente dicha y la capa inferior denominada subbase. Las especificaciones para materiales de capa de base son superiores a las de materiales de subbase en los requerimientos de resistencia, estabilidad, dureza, tipos de agregados y gradación.

La capa de subbase se usa en general para reducir el costo total de construcción del pavimento. La subbase puede omitirse, si la estructura requerida de pavimento es relativamente delgada o si los suelos de la subrasante son de alta calidad.

Además de su función principal, las capas de subbase deben cumplir con otras funciones secundarias como:

- ✓ Evitar que los suelos de grano fino del lecho del camino se filtren dentro de las capas de base. Se deben especificar materiales bien gradados, si la subbase está destinada a servir para este propósito.

- ✓ Para minimizar los efectos de la congelación. Para este propósito, se deben especificar materiales no susceptibles a la acción perjudicial de la congelación.
- ✓ Para ayudar a evitar la acumulación de agua libre dentro o debajo de la estructura del pavimento. Se debe especificar material que drene el agua de una forma relativamente rápida y se deben proporcionar los medios de coleccionar y eliminar el agua acumulada de la subbase.
- ✓ Impedir que el agua de la capa subrasante ascienda por capilaridad y evitar que el pavimento sea absorbido por la subrasante.
- ✓ Transmitir en forma adecuada los esfuerzos a la subrasante.
- ✓ En los cortes de roca, proveer una plataforma de trabajo para equipo de construcción o para subsecuentes capas del pavimento.

Capa superficial

Además de su función como una parte estructural del pavimento, la capa superficial se debe proyectar para resistir las fuerzas abrasivas de tráfico, limitar la cantidad de agua superficial que penetra en el pavimento, proveer una superficie resistente a deslizamiento y proporcionar una superficie uniforme y estable de color y textura conveniente para proveer un excelente servicio a los usuarios de la vía. La capa superficial también debe ser durable, capaz de resistir fracturas y desmoronamientos sin llegar a ser inestable en las condiciones del tráfico y del clima.

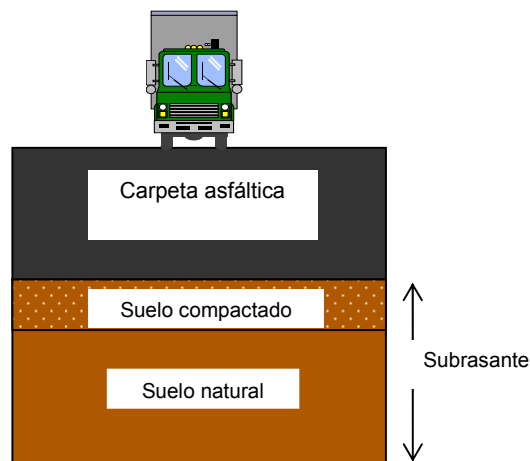
Comúnmente construida sobre una capa de base, la capa superficial de una estructura de pavimento flexible consta de una mezcla de agregados minerales y

de materiales bituminosos. El éxito de tal capa depende sobre todo de la obtención de una mezcla con la óptima gradación de agregado y porcentaje adecuado de ligante bituminoso.

1.2.2. Pavimento de capa asfáltica gruesa

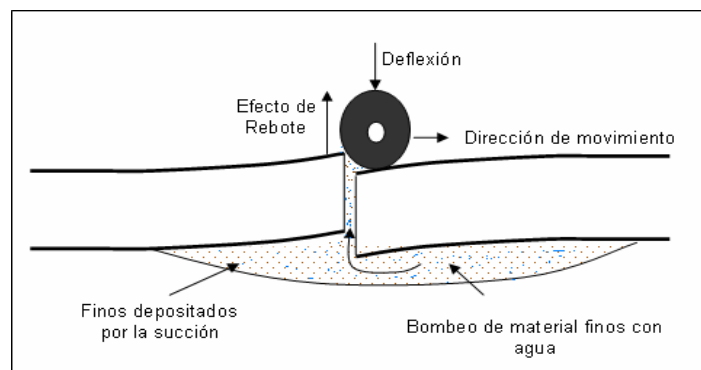
Los pavimentos de capa asfáltica gruesa están conformados por una o más capas de mezcla asfáltica en caliente, colocadas directamente en el suelo o el suelo mejorado, concepto que fue concebido por el Instituto del Asfalto en 1960. Este tipo de construcción es conveniente en áreas donde no se tiene disponibilidad de materiales y es más económico adquirir solamente un material asfáltico, que varios materiales de diversas fuentes.

Figura 3. Estructura de pavimento de capa asfáltica gruesa



la superficie al estar sometido a las presiones ejercidas por el tránsito sobre las losas.

Figura 5. Fenómeno de bombeo



Así mismo, esta capa funciona como elemento de transición y suministra un apoyo estable y permanente al pavimento. A su vez, mejora notablemente el drenaje de la estructura y ayuda a evitar la acumulación de agua debajo de las losas. También mejora en parte la calidad de soporte del suelo de subrasante.

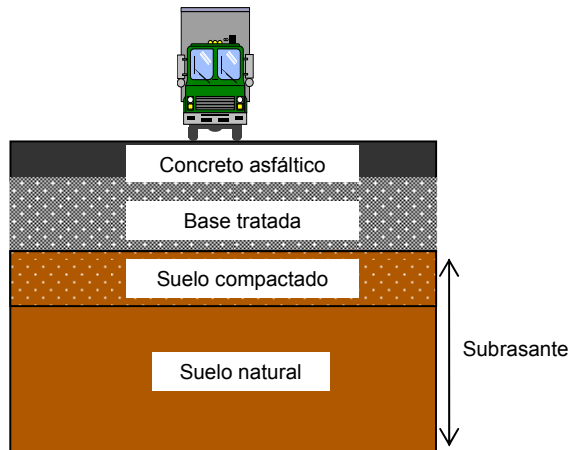
Losa de concreto

Las funciones de la losas de concreto en un pavimento rígido son las mismas que cumple la carpeta asfáltica en un pavimento flexible y a su vez, las losas de concreto deben cumplir la función estructural de soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que se le apliquen.

1.2.4. Pavimento Semi-rígido

La estructura de este tipo de pavimento es muy similar a la de un pavimento flexible, la diferencia radica en que una de sus capas se encuentra rigidizada de una forma artificial, usando alguno de los siguientes aditivos: cal, emulsión, asfalto, cemento o diversos productos químicos. El propósito de estos aditivos es mejorar o modificar las características mecánicas de los materiales ya que no son las ideales, teniendo en cuenta que los materiales apropiados para dicha estructura están muy distantes y su adquisición aumentaría notablemente los costos de la construcción.

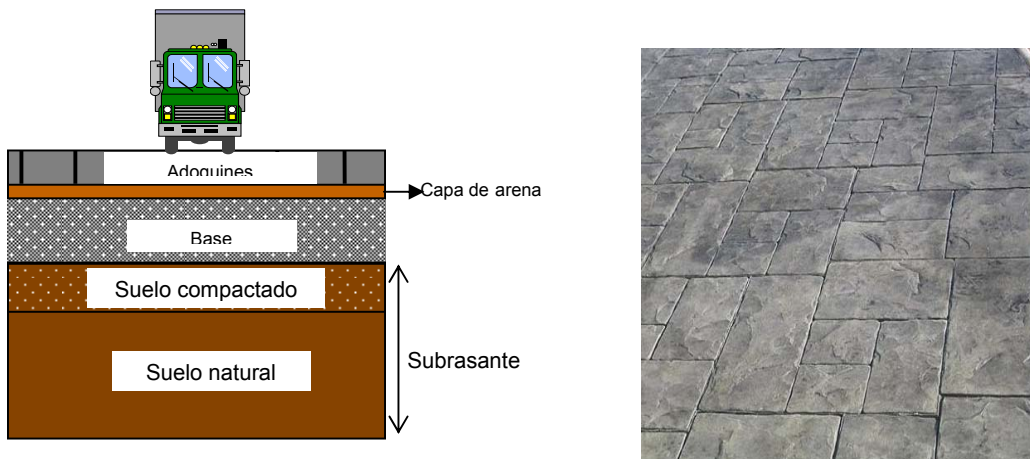
Figura 6. Estructura de capas de un pavimento semi-rígido



1.2.5. Pavimento Articulado

Los pavimentos articulados están formados por una capa de rodadura la cual esta elaborada con bloques de concreto prefabricados, llamados “adoquines” los cuales presentan características similares y espesores uniformes. Estos se pueden colocar sobre una capa delgada de arena la cual, a su vez se apoya sobre una capa de base granular o directamente sobre la subrasante dependiendo de la calidad de esta y dependiendo de la magnitud y frecuencia de las cargas que circulan por la vía.

Figura 7. Estructura de pavimentos articulado



La Base

La Base es la capa colocada entre la subrasante y la capa de rodadura, su principal función es aumentar la capacidad de la estructura de pavimento. Esta capa puede estar compuesta por dos o más materiales seleccionados, en la cual se podrán utilizar material granular, suelos estabilizados o concreto pobre.

Capa de arena

La Capa de arena es colocada directamente sobre la base, es de poco espesor y el material usado es arena gruesa y limpia, libre de materia orgánica, mica, contaminantes y tendrá una granulometría continua tal que la totalidad de la arena pase por el tamiz (3/8") y no más del cinco por ciento (5%) pase por el tamiz (No. 200). Esta capa sirve como asiento para colocar los adoquines y a su vez contribuye con la filtración del agua que ocasionalmente pueda penetrar por las juntas entre los mismos.

Adoquines

Los adoquines deben tener propiedades y características similares para poder resistir adecuadamente las cargas de tránsito y fundamentalmente el desgaste producido por éste.

Sello de arena

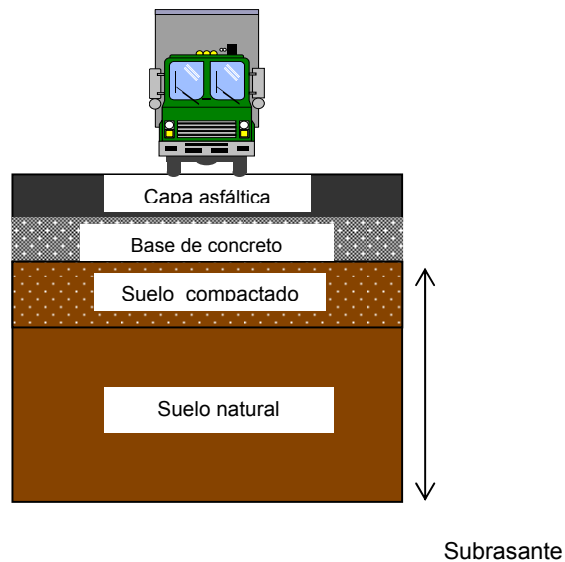
Este sello esta constituido por arena muy fina que es colocada en las juntas entre los adoquines y su principal función es servir de sello a las juntas y contribuir al funcionamiento de la estructura, en conjunto con los demás elementos de la capa de rodadura. La arena que se utilizará para sellar las juntas entre adoquines estará libre de materia orgánica y elementos contaminantes.

1.2.6. Pavimento compuesto

Este tipo de pavimentos esta conformado tanto de capas estabilizadas con cemento Portland como de mezcla asfáltica. El uso de concreto como una capa inferior y de mezcla asfáltica como capa superior da como resultado un pavimento ideal con las mejores características que se puedan desear, aunque su uso se ve limitado por sus costos elevados.

La función del concreto en este tipo de pavimento es proporcionar una base muy fuerte y la de la mezcla asfáltica es contribuir proporcionando una superficie suave y no reflectiva.

Figura 8. Estructura de capas de pavimento compuesto

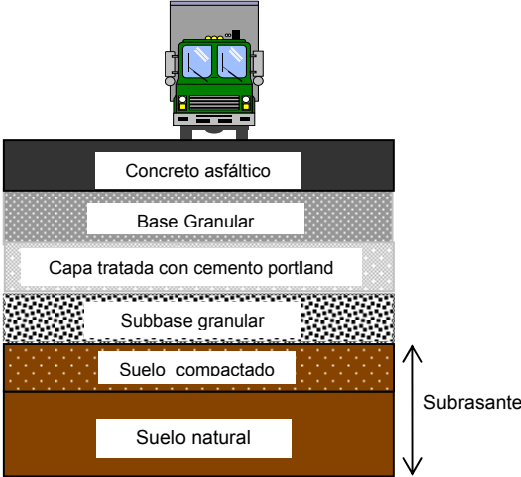


1.2.7. Pavimento de estructura inversa

El pavimento de estructura inversa se caracteriza por tener mayor espesor y rigidez en las capas de apoyo que en las capas de la parte superior de la estructura. En este diseño, la parte inferior de la estructura de pavimento absorbe la mayor parte de la carga provocada por el tráfico.

Entre las capas que conforman este pavimento se encuentra una capa base tratada con cemento Portland, la cual actúa como una sólida plataforma de trabajo para la construcción de la capa base granular y además reduce las tensiones en la base granular y en la capa de asfalto.

Figura 9. Pavimento de estructura inversa



2. LA FUNDACIÓN DE UN PAVIMENTO O SUBRASANTE

La subrasante es aquella parte de la estructura que tiene como función servir de soporte a las otras capas del pavimento. De la calidad de esta capa depende en gran medida el espesor que debe tener un pavimento.

Para dimensionar un pavimento es necesario determinar la capacidad para soportar cargas de los suelos que servirán de fundación a las capas de la estructura, se debe también tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen (hinchamiento y retracción) ya que los cambios volumétricos de un suelo de subrasante de tipo expansivo puede causar graves problemas a cualquier estructura que se apoye sobre estos. Para contrarrestar este tipo de problemas se debe estabilizar el suelo usando algunos aditivos como la cal o evitando los cambios de humedad (impermeabilizando la estructura).

Como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la rigidez del suelo o resistencia a la deformación bajo las cargas de tránsito. La subrasante se puede construir con suelos en su estado natural o suelos con algún proceso de mejoramiento tal como la estabilización mecánica o química, entre otras.

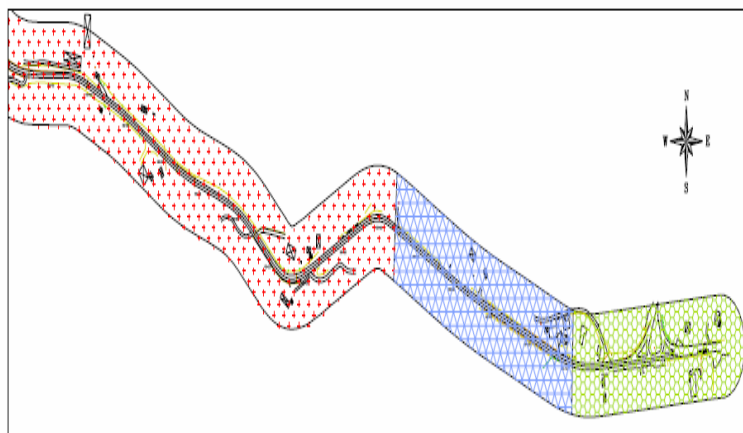
Además es de gran importancia identificar ciertos materiales que son inapropiados para la subrasante como por ejemplo: los Suelos clasificados como A-8 según AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) M 145, debido a que son altamente compresibles y tienen una baja resistencia al corte. De igual manera, este tipo de suelos están conformados en su mayoría por materia orgánica parcialmente descompuesta, generalmente presentan una textura fibrosa, un color negro o pardo oscuro y mal olor.


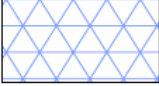
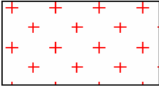
2.1. ANÁLISIS PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DE UN SUELO PARA SUBRASANTE

El estudio de la subrasante para diseño de pavimentos, comprende diferentes etapas:

- a). *Fase de selección de unidades homogéneas de diseño*: Debido a la extensión de las zonas que atraviesa una carretera, el pavimento de la misma se apoya sobre diversos tipos de formaciones geológicas, en consecuencia, en un tramo de carretera se pueden presentar diversos tipos de suelos de subrasante. Para definir su capacidad de soporte es necesario separar por zonas donde los materiales encontrados presenten características similares, la demarcación de las unidades homogéneas de diseño se realiza con base en las características: geotécnicas, climática, topográficas y de drenaje.

Figura 10. Plano de zonas geológicas atravesadas por una carretera



CONVENCIONES	
	<p>ZONA HOMOGÉNEA I</p> <p>Suelos residuales que yacen sobre rocas de la Fm Girón en pendientes moderadas a bajas.</p>
	<p>ZONA HOMOGÉNEA II</p> <p>Rocas, areniscas de grano medio a fino intercaladas con arcillolitas y limolitas de la Fm Girón, cubiertas por coluviones o depósitos de ladera con fragmentos de rocas de la misma formación.</p>
	<p>ZONA HOMOGÉNEA III</p> <p>Areniscas conglomeráticas, areniscas de grano fino a medio intercaladas con arcillolitas o limolitas de la Fm Girón con aptitudes favorables a la estabilidad ante los cortes realizados.</p>

Delimitación de formaciones geológicas: Esta se centra en la reconstrucción del pasado geológico a través del establecimiento de las secciones de historia geológica de la zona, aspectos que resultan de especial interés aplicativo, cuando se trata del desarrollo de actividades que implican remociones, excavaciones y en general, intervenciones en el medio geológico. La representación y distribución de los componentes rocosos del medio, concluyen con la presentación de un esquema zonificado con las diversas agrupaciones litológicas del área, de sus características físicas, químicas y estructurales, de sus posibles usos y de sus implicaciones ambientales en el proceso de realización del proyecto y de su vida útil.

Además, con esta delimitación también se tienen en cuenta las estructuras existentes en la zona, especialmente las fallas; la sismicidad y la hidrogeología, donde es posible la existencia de mantos acuíferos, los cuales pueden ser

eventualmente afectados por el proyecto cuando estos se encuentran a poca profundidad de la superficie.

Determinación del perfil geotécnico de los suelos: Como primer parámetro de ejecución consecuente, se hacen perforaciones en el terreno, para identificar las cantidades y extensiones de suelos existentes en la zona del proyecto, con el propósito de identificar cómo estos se encuentran dispuestos en capas y conocer dónde está ubicado el nivel freático. El número de perforaciones necesarias para conocer el perfil del suelo, se basa en la experiencia dependiendo de la uniformidad del suelo.

Los datos que se deben tomar de cada una de las perforaciones realizadas son: el espesor de las capas encontradas y su posición exacta en sentido vertical, así como la identificación visual de los materiales, indicando su color y consistencia. Además se debe registrar, la posición del nivel freático en caso de descubrirlo debido a que este es muy importante cuando se diseñen los elementos de drenaje en la obra vial.

Se debe tomar una muestra de las diferentes capas de suelo encontradas en cada perforación realizada, dichas muestras pueden ser alteradas o inalteradas.

Ensayos de laboratorio a las muestras obtenidas para determinar sus propiedades generales en relación con la estabilidad y capacidad de soporte de la subrasante: Es necesario establecer las propiedades físicas de cada uno de los suelos muestreados y también conocer su comportamiento bajo diversas condiciones, por esta razón se realizan diversas pruebas como:

- ✓ *Determinación del contenido de humedad, límite plástico y límite líquido* El contenido de humedad de un suelo, puede indicar posibles

comportamientos del mismo al ser utilizados como subrasante, pues si el contenido de agua esta cerca del límite líquido es probable que el suelo sea sensitivo, si el contenido de agua por el contrario es cercano al límite plástico este tipo de suelo probablemente pueda presentar un buen comportamiento.

✓ *Análisis de granulometría:* Los resultados de esta prueba permiten realizar la clasificación del suelo, el cual puede pertenecer a alguno de los siguientes grupos o ser una combinación de los mismos:

- **Grava:** Las gravas son partículas granulares de material pétreo de tamaño variable, el cual se puede considerar como un agregado grueso. Este material se origina por fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial.
- **Arena:** Son partículas de un tamaño considerable, este tipo de suelo permite que el agua drene muy rápidamente a través de él.
- **Limo:** Este material esta compuesto por partículas intermedias entre la arcilla y la arena, en estado húmedo es difícil de trabajar. Los limos son fracciones microscópicas del suelo que constituyen granos muy finos de cuarzo y algunas partículas en forma de escamas que son fragmentos de minerales micáceos.
- **Arcilla:** Las arcillas son principalmente partículas submicroscópicas en forma de escamas, las cuales presentan muy poco espacio entre si. La arcilla tiene la habilidad de retener el agua, el aire no puede penetrar en estos espacios, especialmente cuando ellos están saturados con agua. Se caracteriza por un pobre drenaje y aireación. La arcilla húmeda es difícil de trabajar y cuando está seca es muy dura.

- ✓ *Determinación de densidad de campo y grado de compactación del suelo:*
Generalmente, alta densidad de los suelos se relaciona con alta resistencia.

 - ✓ *Determinación del suelo típico de subrasante para una unidad de diseño:*
Después de determinar las propiedades de las diferentes capas de suelo como son granulometría, el límite líquido y límite plástico, se procede a dibujar un perfil del suelo, el cual permite identificar las características propias del terreno donde se va a ejecutar la obra y delimitar las secciones que para el dimensionamiento de estructuras se van a considerar homogéneas.
- b). Fase de selección de la resistencia o capacidad de soporte para diseño:** Los suelos de subrasante normalmente no alcanzan la falla por esfuerzo cortante, pero los pavimentos fallan por deformaciones acumuladas después del paso de muchas repeticiones de carga y por fisuras en los materiales tratados con ligantes por fatiga ante la aplicación reiterada de cargas. Para caracterizar un suelo de subrasante es más importante establecer las relaciones esfuerzo-deformación ante las sollicitaciones de tránsito que la capacidad última bajo cargas estáticas.

El parámetro más empleado para definir la capacidad de soporte de una subrasante es el Módulo Resiliente, parámetro similar al módulo elástico de un material, pero en el cual las deformaciones que se emplean solamente incluyen la componente recuperable de las mismas. Por tratarse de una propiedad de difícil determinación en laboratorio y aún más difícil en su análisis, se emplean ensayos menos apropiados pero de más fácil ejecución. Algunos de los ensayos más comunes para la obtención de la resistencia de los suelos son:

- **Ensayo de CBR (California Bearing Ratio): (AASHTO-T193-63):** La relación de soporte de California (CBR) es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, este parámetro es aplicado principalmente en el diseño de pavimentos flexibles y en el control de calidad de materiales empleados en la construcción de carreteras.

Se usa en el diseño de pavimento flexible y se aplica para la evaluación de la calidad relativa de suelos de subrasante, algunos materiales de subbases y bases granulares, que contengan solamente una pequeña cantidad de material que pasa por el tamiz de 50 mm, y que es retenido en el tamiz de 20 mm. Se recomienda que la fracción no exceda del 20%.

Este ensayo es una adaptación especial del valor portante, se realiza aplicando una carga sobre la superficie del suelo con un pistón circular de 1,95 pulg de diámetro (sección transversal 3 plg²) y se hace penetrar en el terreno a una velocidad de 0.05 pulgadas por minuto.

El número CBR se obtiene como la relación de la carga unitaria en kg/cm² (lb/pulg² (psi)) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón dentro de la muestra compactada de suelo, con un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturada, en ecuación, esto se expresa así:

$$CBR = \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} * 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Los valores de carga unitaria que deben utilizarse según el Instituto Nacional de Vías, en la ecuación son:

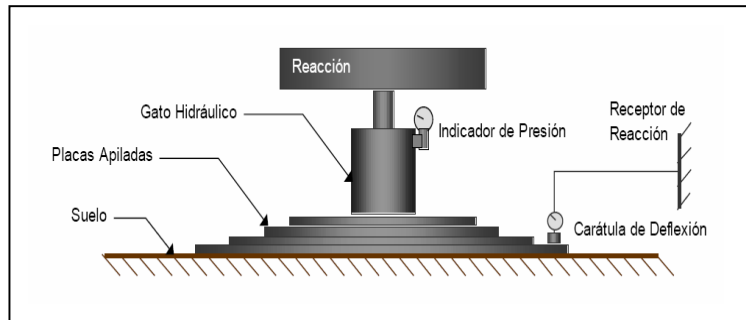
Tabla 1. Valores de Carga Unitaria

Penetración		Carga unitaria patrón		
mm.	Pulg.	Mpa.	kg./cm ²	Psi
2,54	0,1	6,90	70,31	1000
5,08	0,2	10,35	105,46	1500

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS) año 2007

- **Ensayo de carga directa sobre placa:** (AASHTO D1195 y D1196): Con esta prueba se evalúa la capacidad portante de la subrasante, las bases y en ocasiones los pavimentos completos. Aunque esta prueba generalmente se usaba en pavimentos rígidos actualmente también se usa en los flexibles. El ensayo se hace cargando una placa circular en contacto estrecho con el suelo, midiendo las deformaciones finales correspondiente a los distintitos incrementos de carga utilizados. Con esta prueba se puede obtener el módulo de reacción de una subrasante que son las presiones necesarias que se transmitirán a la placa para producir en el suelo una deformación prefijada.

Figura 11. Ensayo de prueba de placa

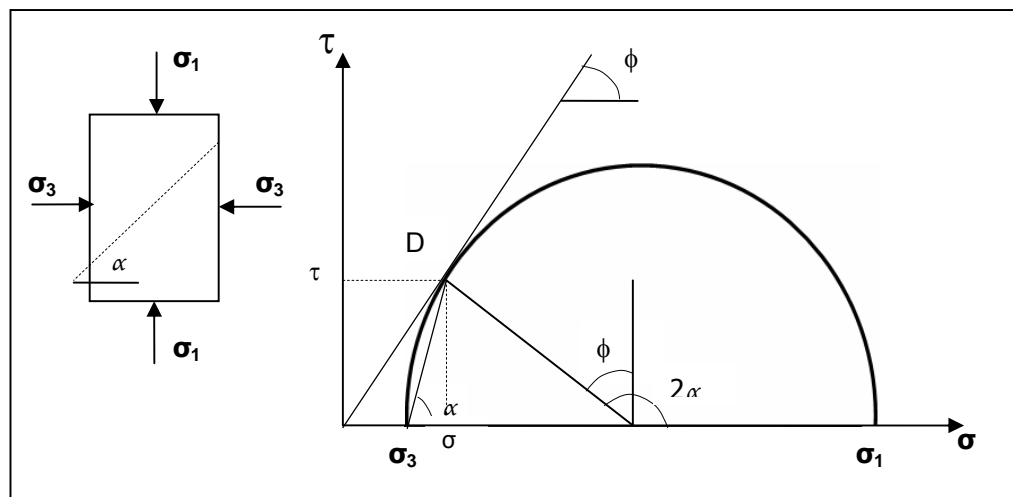


- **Resistencia al esfuerzo cortante:** Al modificar el estado tensional de los suelos se producen deformaciones que pueden originar su rotura. Aunque los suelos con cohesión se rompen a veces por tracción, como puede ser el caso de las grietas verticales, la forma de rotura más habitual en los suelos es por esfuerzo cortante. La resistencia al corte de un suelo depende, entre otros factores de las características de carga.

Para poder obtener dicho esfuerzo, Mohr presentó una teoría sobre la rotura de los materiales en la que afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante y no sólo cuando uno de ellos se maximiza. Su criterio establece que la falla por corte sucede a lo largo de la superficie donde la relación τ / σ alcance un cierto valor máximo. En la actualidad se emplea como criterio de falla el denominado **Mohr-Coulomb**, con una envolvente de falla curva, como se muestra en la Figura 12. Para la mayoría de los problemas que se abordan en Mecánica de Suelos, en el rango de tensiones de trabajo, puede asemejarse a una recta. Se considera que la falla se produce por la sollicitación de corte y se acepta que ésta depende del esfuerzo normal actuante en el plano de falla.

Si se considera un elemento de suelo sometido a las presiones normales principales σ_1 y σ_3 siendo la presión vertical mayor que la horizontal, es decir, $\sigma_1 > \sigma_3$, se tiene un sistema plano de tensiones, donde los pares de tensiones σ y τ que se ejercen sobre planos intermedios a los principales quedan representados en el círculo de Mohr.

Figura 12. Representación del círculo de Mohr



Uno de los puntos del círculo de Mohr tendrá una combinación de tensiones σ y τ que producirá la rotura en un plano de inclinación α respecto al plano en que se ejerce la tensión principal mayor, en este caso σ_1 . Este es el punto D donde el círculo de Mohr resulta tangente a la línea de resistencia al corte denominada *línea de resistencia intrínseca* la cual se puede calcular así:

$$\tau = C + \sigma * \tan \phi$$

Ecuación (2)

Donde:

τ : Esfuerzo cortante

σ : Presión normal en el plano de rotura

C: Segmento interceptado en el eje de las ordenadas: teóricamente es la cohesión.

ϕ : Angulo con la horizontal

- **Valor portante:** El valor portante (k) de un suelo es un valor que no es constante ya que, además del tipo de terreno, depende del tipo, forma y tamaño de la cimentación que se proyecte. Se mide en kilogramos por centímetro cuadrado. Este parámetro se puede obtener por varios métodos entre los cuales tenemos:

A partir de ensayo in situ, mediante el ensayos de penetración dinámica y de carga sobre placa.

A partir de ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas de sondeos pueden realizarse varios tipos de ensayos de cuyos resultados se puede obtener mediante el cálculo de la capacidad portante del terreno, los ensayos más usuales son: compresión simple, corte directo y triaxial.

- **Módulo resiliente:** El módulo resiliente proporciona la relación básica entre esfuerzo y deformación de los materiales y es un parámetro usado en el análisis estructural de sistemas estratificados. Además, aporta un medio de evaluación de los materiales para la construcción de pavimentos, ya que este ensayo se realiza teniendo en cuenta diversas condiciones ambientales

y de estado de esfuerzos, las cuales simulan las situaciones reales de cargas de tránsito a las que se someterá la estructura.

Una rueda que se mueve imparte un pulso dinámico a todas las capas de pavimento y a la subrasante. Como respuesta a este pulso dinámico, cada capa de pavimento sufre una deflexión. El pulso solicitante varía desde un valor muy bajo hasta un máximo en un breve período, en función de la velocidad del vehículo.

Para tratar de simular en laboratorio este tipo de sollicitación se practican ensayos triaxiales sobre una muestra de suelo, aplicando diversas presiones de confinamiento y pulsos de carga axiales que ejemplifican la carga de la llanta.

Figura 13. Máquina usada para el ensayo triaxial

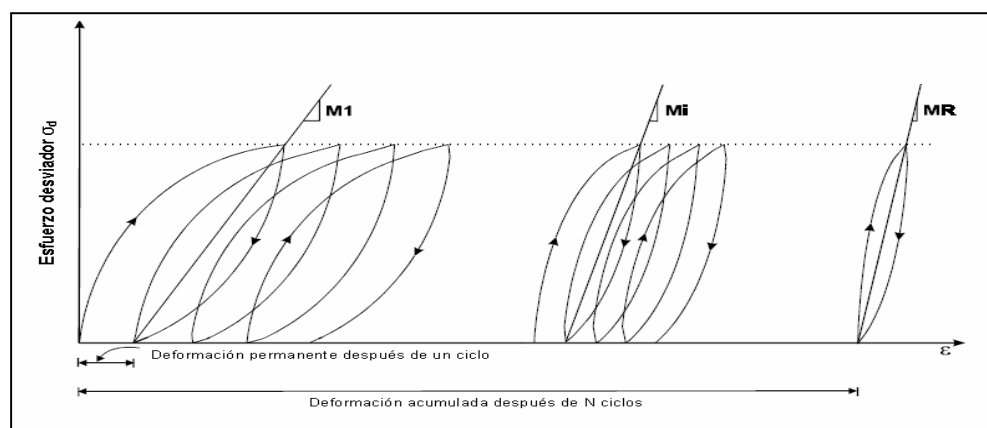


Este no es un ensayo a rotura y las muestras no fallan durante la ejecución del mismo, por el contrario, este ensayo muestra el comportamiento del material bajo cargas repetidas. A medida que el material está sujeto a la

acción de la carga, se deforma y recupera cuando se retira la carga, sin embargo, el material nunca recupera su forma original y alguna deformación permanente ocurre. Esta deformación se denomina plástica, la cual bajo carga móvil y repetida, tiende a hacerse acumulativa y puede llegar a alcanzar valores inadmisibles. Mientras que la deformación recuperable es la deformación resiliente.

Paradójicamente, este proceso suele ir acompañado de una “densificación” de los materiales, de manera que el pavimento afectado puede ser más resistente que el original. En la Figura 14 se ilustra el mecanismo por el cual la deformación permanente se va acumulando; debe hacerse notar el hecho de que en los ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales.

Figura 14. Mecanismo de deformación permanente en los pavimentos



La muestra de suelo llega así, a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente (en donde el módulo secante es igual al módulo resiliente).

La deformación elástica repetida preocupa sobre todo en materiales con resistencia a la tensión -carpetas asfálticas o capas estabilizadas- colocados en la parte superior de la estructura, en los que se puede llegar a generar una falla de agrietamiento por fatiga si el número de repeticiones es importante y los materiales son susceptibles a este efecto. La importancia que la deformación tiene en los pavimentos es debida a que en los métodos de diseño actuales la deformabilidad es el punto básico a considerar y de hecho, la mayoría de ellos se centran en mantenerla en límites razonables.

Debido a que el módulo resiliente se determina con equipos especiales que no son de fácil adquisición se puede emplear algunos métodos con los cuales se establecen algunas correlaciones como con el CBR, ya que este es un valor de más amplio conocimiento:

→ El Instituto del Asfalto y la Guía AASHTO proponen el uso de la siguiente correlación para suelos finos con $CBR < 10\%$, la cual fue creada por Heukelom y Klomp, en 1962, quienes usaron pruebas de compactación dinámica para su obtención.

$$Mr. (kg. /cm^2) = 100 * CBR \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$Mr. (MPa) = 10.3 * CBR \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$Mr. (lb. /plg^2) = 1500 * CBR \quad \text{Ecuación (5)}$$

El coeficiente de 1500 puede variar de 750 a 3000 con un factor de 2. La información obtenida indica que esta relación funciona de una forma mas adecuada cuando se trabaja con valores de CBR inferiores de 20. En otras palabras la correlación parece ser más acertada para suelos finamente gradados y para arenas finas, que para materiales granulares.

- ✓ *Ensayos adicionales:* Cuando los suelos presentan algunas condiciones que son poco usuales, se hace necesario realizar algunas pruebas adicionales. Por ejemplo, en suelos expansivos afectados por las variaciones climáticas de humedad puede requerir estabilización con algún aditivo o compactación a baja densidad con alta contenido de humedad, en cada caso ajustándose al tipo de superficie y cargas de diseño.

También es importante saber que todos los suelos de subrasante, cohesivos o no, son susceptibles de consolidarse debido a la acción de las cargas del tránsito. Por lo tanto, el diseño deberá especificar la profundidad y el grado de densificación y la estabilización que requiere para asegurar un comportamiento adecuado del pavimento.

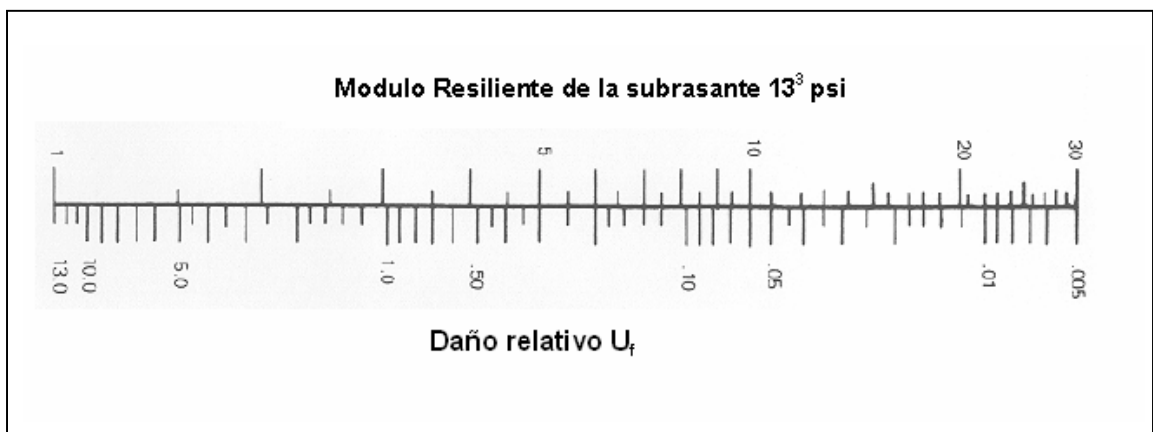
Medida y selección del valor de resistencia de un suelo típico de subrasante y de una unidad de diseño: Debido a que la base fundamental para caracterizar debidamente los materiales de la subrasante, depende de la obtención del módulo resiliente, la AASHTO recomienda que al suelo de subrasante que predomine en el lugar, se le efectúen pruebas de laboratorio (AASHTO T-274), tomando muestras que representen las condiciones de tensión y humedad que simulen las estaciones del año respectivas.

Tomando los valores de módulo resiliente obtenidos para las distintas épocas del año como son las lluviosas y la secas, se determina el valor de daño relativo U_f en cada estación del año (mensual o quincenal), mediante la figura 15 o usando la ecuación 6. Posteriormente, se determina el daño relativo medio anual, para lo cual se suman todos los valores de U_f y se dividen en el número total de meses tomados en cuenta como se muestra en la ecuación 7. Finalmente el módulo de la subrasante es el correspondiente al U_f promedio ponderado.

$$U_f = 1.18 \times 10^8 (M_R)^{-2.32} \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$\bar{U}_f = \text{Promedio de daño relativo} = \frac{\sum U_f}{n} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Figura 15. Módulo efectivo de Resiliencia de la subrasante para pavimentos flexibles en función del criterio de serviciabilidad.



Fuente: Guía para diseño de pavimentos AASHTO, 1993.

Ejemplo resuelto

Determinar el M_R efectivo para una zona, en la cual se realizó el análisis mes a mes del M_R de la subrasante, obteniendo la siguiente información:

Meses	Módulo resiliente de la subrasante M_R (Psi)	Daño Relativo U_f
Enero	15000	0,0241741
Febrero	13000	0,0336925
Marzo	4000	0,5189229
Abril	7000	0,1416624
Mayo	7000	0,1416624
Junio	5000	0,3092229
Julio	5000	0,3092229
Agosto	5000	0,3092229
Septiembre	5000	0,3092229
Octubre	5000	0,3092229
Noviembre	4000	0,5189229
Diciembre	15000	0,0241741
Uf.=		2,9493256
Uf prom.=		0,2457771

Solución:

→ El daño relativo de cada mes se calcula por medio de la ecuación 6 o la gráfica 15 y se adjunta en la columna 3 de la anterior tabla.

$$U_f = 1.18 \times 10^8 (M_R)^{-2.32} = 1.18 \times 10^8 (15000)^{-2.32} = 0.0241741$$

→ Posteriormente se suman estos valores y se calcula el promedio usando la ecuación 7.

$$\bar{U}_f = \text{Promedio de daño relativo} = \frac{\sum U_f}{n}$$

$$\bar{U}_f = \frac{0.0244741 + 0.0336925 + \dots + 0.0241741}{12}$$

$$\bar{U}_f = 0.2457771$$

→ Luego por medio de la ecuación 6, con el valor promedio de daño relativo calculado en el paso anterior, se calcula el M_R efectivo del sector.

$$U_f = 1.18 \times 10^8 (M_R)^{-2.32}$$

$$0.24577771 = 1.18 \times 10^8 (M_R)^{-2.32} \quad \text{Despejando } M_R \text{ se tiene:}$$

Respuesta: el módulo resiliente de dicha zona en análisis es **$M_R = 5520$ Psi.**

Como en la unidad de diseño se pueden presentar diversos valores de módulo resiliente (uno para cada muestra), es necesario seleccionar un valor característico de la unidad, por medio de alguno de los métodos que se mencionan a continuación:

- ✓ Para dimensionar pavimentos por métodos sugeridos por AASHTO, el cálculo del módulo resiliente de una unidad de diseño, se obtiene calculado el promedio de los valores de módulos establecidos para cada muestra del suelo típico.
- ✓ Otra forma para la determinación del valor de módulo resiliente de diseño, es mediante el uso de un procedimiento estadístico (percentiles) basado en la importancia de la carretera donde se construirá el pavimento. El módulo resiliente de diseño se define como el valor que es menor o igual al 60, 75, u 87,5 por ciento de los valores obtenidos en las diferentes muestras .

Tabla 2. Módulo resiliente de diseño para subrasante

Nivel de tránsito	Módulo resiliente de diseño Valor del Percentil (%)
10^4 o menos	60.0
Ente 10^4 y 10^6	75.0
10^6 o mas,	87.05

Ejemplo resuelto

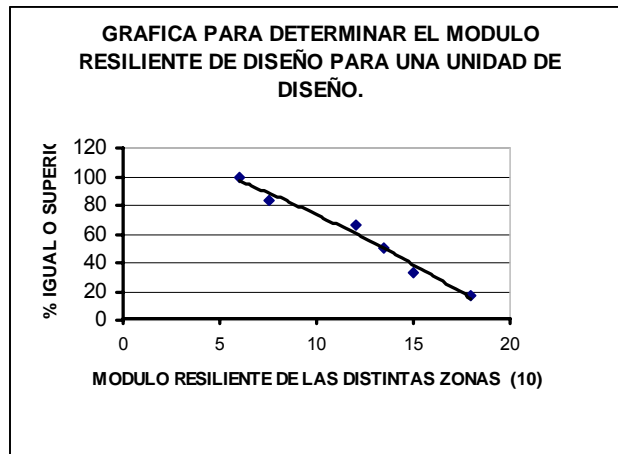
Determinar el módulo resiliente de una unidad de diseño para un nivel de tránsito de 10^6 , si se tienen los siguientes valores de módulo resiliente para 6 zonas distintas. (6000, 12000, 15000, 13500, 7500, 18000)

Solución:

→ Se ordenan los valores de módulo resiliente y se calcula el percentil para cada uno de ellos.

Valore obtenidos mediante pruebas	Número igual o superior	Percentil igual o superior
18000	1	16,7
15000	2	33,3
13500	3	50,0
12000	4	66,7
7500	5	83,3
6000	6	100,0

→ Se grafican los valores de módulo resiliente y los percentiles obtenido en el pasan anterior.



- Con el nivel de tránsito para el cual se desea diseñar el pavimento se ingresa a la tabla 2 y se obtiene el porcentaje del percentil para el módulo resiliente de diseño, para este caso es de 75%.
- Con este valor de percentil, se entra a la gráfica obtenida anteriormente y se determina el valor del Módulo Resiliente de diseño que es $M_R=10000$ Psi.

2.2. ESTABILIZACIÓN O MEJORAMIENTO DEL MATERIAL

Los materiales que conforman la capa de apoyo de los pavimentos deben cumplir unas especificaciones establecidas para soportar las capas superiores y los esfuerzos a los que se somete el sistema en todo momento. Debido a que algunos proyectos se ubican en zonas que presentan suelos finos de baja capacidad de soporte, con algún grado de inestabilidad originado por su plasticidad y compresibilidad o suelos que no tienen la resistencia apropiada y además presentan baja capacidad portante y deficientes propiedades mecánicas, las

cuales contribuyen a la degradación de las capas granulares y en el general en el comportamiento de la estructura de pavimento.

La estabilización de los suelos consiste en agregar un producto químico o aplicar un tratamiento físico, para modificar las características de los suelos, corrigiendo de esta forma deficiencias para darle una mayor resistencia al terreno, disminuir su plasticidad o reducir su potencial expansivo. A continuación se presentan algunas formas de lograr mejorar dichas propiedades de los suelos:

✓ ***Físicas.***

- Mezclas de suelos
- Geotextiles
- Consolidación previa.

✓ ***Químicas.***

- Cal. Económica para suelos arcillosos (disminuye plasticidad)
- Cemento Pórtland para arenas o gravas finas (aumenta la resistencia)
- Productos asfálticos. Para material triturado sin cohesión (emulsión, muy usada)
- Cloruro de sodio. Para arcillas y limos (impermeabilizan y disminuyen los polvos)
- Cloruro de calcio Para arcillas y limos (impermeabilizan y disminuyen los polvos)
- Escorias de fundición. Comúnmente en carpetas asfálticas, dan mayor resistencia, impermeabilizan y prolongan la vida útil.

- Polímeros. Comúnmente en carpetas asfálticas, dan mayor resistencia, impermeabilizan y prolongan la vida útil.
- Hule de neumáticos. Comúnmente en carpetas asfálticas, dan mayor resistencia, impermeabilizan y prolongan la vida útil.

✓ **Mecánicas.**

- Compactación: este tipo de mejoramiento regularmente se hace en la subbase, base y en carpetas asfálticas.

A continuación se mencionan algunos de los métodos más comunes para la estabilización del material:

- *Geotextiles*. Los geotextiles son telas permeables no biodegradables que pueden emplearse como estabilizadores de suelos blandos y como elementos para mejorar los problemas de erosión de suelos y también para distribuir las cargas en los pavimentos. Se emplean geotextiles tejidos y no tejidos elaborados a partir de polímeros sintéticos de cadena larga, compuestos con un porcentaje mínimo del 95% en peso de poliolefinas o poliéster.

Figura 16. Estabilización con geotextiles



- *Estabilización con cal.* Es un método económico para disminuir la plasticidad de los suelos y darle un aumento en la resistencia. La cal, sola o en combinación con otros materiales, puede ser utilizada para tratar varios tipos de suelos. Las propiedades mineralógicas de los suelos determinarán su grado de reactividad con la cal y la resistencia final que las capas estabilizadas desarrollarán.

Figura 17. Estabilización con cal (Distribución de la Cal)



- *Estabilización con cemento Pórtland.* Este tipo de mejoramiento es muy común en las bases, ya que resulta muy importante que éstas y la carpeta presenten un módulo de elasticidad semejante, porque con ello se evita un probable fracturamiento de la carpeta, debido a que ambas trabajan en conjunto. Para conocer el porcentaje óptimo de cemento por emplear se efectúan pruebas de laboratorio con diferentes contenidos de cemento hasta encontrar la cantidad de cemento que permita mejorar las propiedades del material como son: aumentar la resistencia y disminuir la plasticidad.

Figura 18. Estabilización con cemento portland



- *Mejoramiento con productos asfálticos.* El material asfáltico que se emplea para mejorar un suelo puede ser el cemento asfáltico o bien las emulsiones asfálticas. Pero el uso de cementos asfálticos puede resultar un poco más costoso ya que no puede mezclarse con material pétreo húmedo. Por esta razón, las emulsiones asfálticas, son unos de los materiales mas usados ya que estos tipos de productos pueden emplearse con material pétreo húmedo y no se necesitan altas temperaturas para hacerlo maniobrable. Para el uso de este producto se emplea un emulsificante que puede ser el sodio o el cloro, para darle una cierta carga a las partículas y con ello evitar que se unan dentro de la emulsión; cuando se emplea sodio, se tiene lo que se conoce como *emulsión aniónica* con carga negativa y las que tienen cloro son las *emulsiones*

catiónicas que presentan una carga positiva, siendo estas últimas las que presentan una mejor resistencia a la humedad que contienen los materiales pétreos. Se tienen emulsiones de fraguado lento, medio y rápido, de acuerdo al porcentaje de cemento asfáltico que se emplea.

Este tipo de aglutinantes puede usarse casi con cualquier tipo de material aunque por economía se recomienda se emplee en suelos gruesos o en materiales triturados que no presenten un alto índice de plasticidad, puede usarse también con las arcillas pero solo le genera impermeabilidad, resultando un método muy costoso, además con otros productos se logra mayor eficiencia y menor costo para los suelos plásticos.

Es importante que el material pétreo que se va a mejorar, presente cierta rugosidad para que exista un anclaje adecuado con la película asfáltica, situación que se agrava si el material pétreo no es afín con el producto asfáltico. Algunos productos asfálticos contienen agua, si esto no es tomado en cuenta pueden presentarse problemas muy serios al momento de compactar.

Figura 19. Estabilización con productos asfálticos



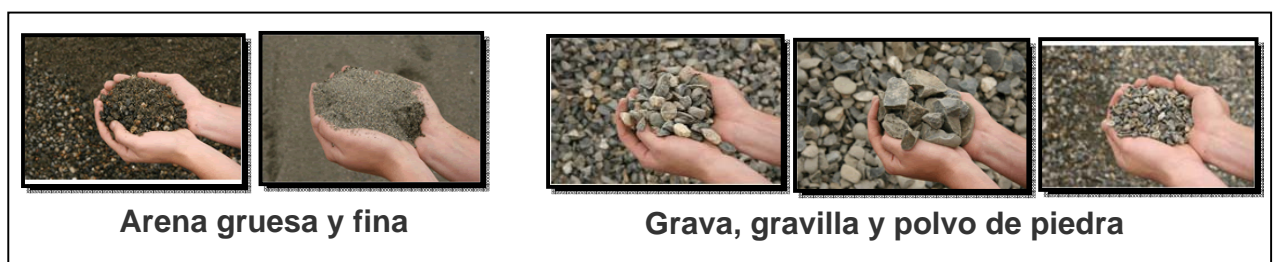
3. MATERIALES PARA CAPAS DE PAVIMENTOS

Los materiales que conforman una estructura de pavimento, constantemente se encuentran sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tránsito vehicular, por esta razón es necesario que los materiales que conforman los pavimentos presenten ciertas propiedades y característicos, a través de las cuales se pueda tener una perspectiva de su posible comportamiento en el transcurso de su vida útil y así poder prevenir factibles problemas que se puedan presentar con el transcurso del tiempo.

3.1. MATERIALES PARTICULADOS

Al referirnos a material particulado estamos hablando de materiales granulares que se usan ampliamente para bases, subbases y rellenos de carreteras. Los materiales particulados también se usan en combinaciones con un material cementante para formar concretos para bases, subbases, superficies de desgaste y estructuras de drenajes.

Figura 20. Algunos materiales particulados



Las principales funciones de las capas construidas con estos materiales son aumentar la capacidad portante del pavimento distribuyendo las cargas por medio de un espesor finito y además proporcionar un buen drenaje a la estructura. Las fuentes de dichos materiales incluyen los depósitos naturales de arenas y grava, los pavimentos pulverizados de concreto y asfalto, el material pétreo resquebrajado y la escoria de altos hornos. Dichos materiales deben cumplir unos requisitos de calidad para garantizar un buen comportamiento de la estructura.

3.1.1. Propiedades generales de las capas granulares

Debido a que la base y la subbase granular son elementos estructurales del pavimento que en conjunto con la capa asfáltica tienen como propósito distribuir las cargas de tránsito sobre la subrasante o fundación es indispensable hacer un análisis del comportamiento y funcionamiento del conjunto y no solo analizar las propiedades de los agregados. Para que estas capas cumplan con estos requisitos es necesario que cumplan los siguientes requerimientos:

- ❖ **Resistencia a la abrasión.** La resistencia a la abrasión, desgaste, o dureza de un agregado, es una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre. Este factor cobra importancia cuando las partículas van a estar sometidas a un roce continuo como es el caso de los pavimentos, para lo cual los agregados que se utilizan deben estar duros. La resistencia mecánica del esqueleto mineral es un factor predominante en la evolución del comportamiento de una capa de firme después de su puesta en servicio. La evaluación de dicha resistencia se realiza mediante diversos ensayos de laboratorio; sin embargo, ninguno de ellos caracteriza el estado

tensional del agregado en el conjunto del firme. Se realizan una serie de ensayos que tienden a reproducir en laboratorio de manera más sencilla el comportamiento que luego tendrán los agregados en servicio, para ello se preparan las muestras con granulometrías próximas a las que van a ser puestas en obra, sometiéndolas a un desgaste que, de forma indirecta, proporciona información de la resistencia mecánica del material. (INV E-218).

Figura 21. Ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles.



Figura 22. Ensayo de desgaste micro-Deval



- ❖ **Resistencia a la alteración:** Los fallas detectados en un firme al poco tiempo después de su puesta en servicio, comúnmente suelen ser ocasionados por procesos de alteración de los agregados en alguna de sus capas, los cuales pueden desencadenarse debido a alguna reacción química con alguno de los componentes de los ligantes asfálticos o conglomerantes, por la acción de la helada o, simplemente, por la siempre inevitable presencia de agua.

Existe la necesidad de evaluación de la alterabilidad de un agregado pétreo por el procedimiento que sea y se pueden señalar a título indicativo, los siguientes caminos: análisis de los agregados, acción de soluciones salinas o de agua oxigenada, ciclos hielo – Deshielo, inmersión en agua y ciclos de humedad – sequedad. (INV E-233)

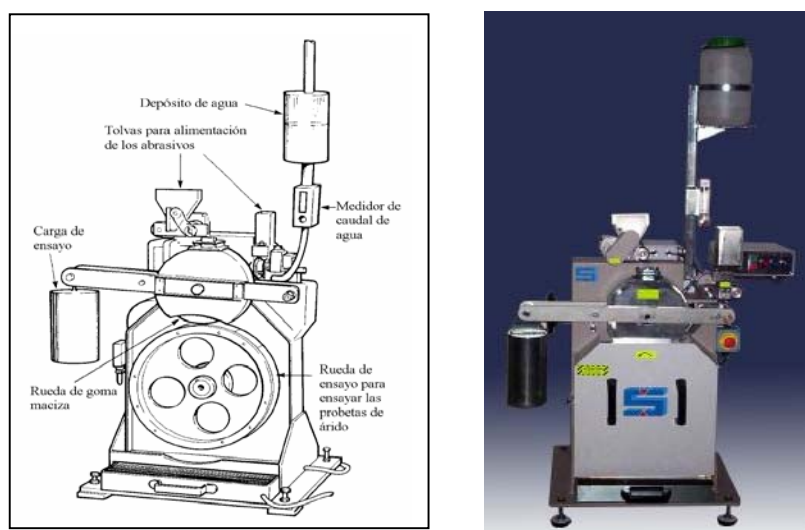
Figura 23. Ensayo de Sanidad en sulfato



- ❖ **Resistencia al pulimento:** La resistencia al pulimento de las partículas del agregado, es la resistencia a perder aspereza en su textura superficial, tiene gran importancia desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento cuando dichas partículas van a ser empleadas en una capa de rodadura. Para

su evaluación se han desarrollado los ensayos de pulimento acelerado (INV E-232).

Figura 24. Ensayo de resistencia al pulimento



- ❖ **Granulometría:** Para poder lograr una alta densidad durante el proceso de compactación es necesario que los agregados tengan una buena gradación, la cual se logra con la diversidad en el tamaño y la forma de los agregados, dicha variedad en los agregados facilita el acomodamiento y entrecruzado entre los mismos y por lo tanto esto hace que la estructura granular presente una alta resistencia mecánica.
- ❖ **Resistencia a la deformación:** Debido a la acción de las cargas que se presentan en una estructura de pavimento es necesario que las capas resistan de una forma adecuada el desplazamiento, pero sin llegar a producir descompactación de la estructura, dicha función esta relacionada directamente

con la plasticidad del material, la cual directamente esta afectada por la cantidad de finos.

- ❖ **Resistencia mecánica:** Debido a que la principal función de las capas granulares es estructural, ya que estas son las encargadas de absorber la mayor parte de los esfuerzos y transmitirlos a sus capas subyacentes de una forma adecuada, por esta razón dicha propiedad de resistencia esta directamente ligada con el valor de CBR, para la subbase se requieren valores de CBR menores que para la base.

- ❖ **Plasticidad y limpieza:** Para que un agregado se comporte adecuadamente dentro de cualquier capa de firme, debe estar completamente limpio, libre de partículas de naturaleza orgánica, polvo o arcillas. Las fracciones gruesas deben estar exentas de polvo, fijando los límites admisibles a través del denominado coeficiente de limpieza. Se debe garantizar que en presencia de agua, la capa en cuestión conserve sus características resistentes y que, en su caso, no haya problemas de adhesividad con los ligantes asfálticos. En ocasiones aunque el agregado fino no sea plástico, puede estar contaminado por partículas no arcillosas, que no se hayan podido detectar mediante los límites de Atterberg, pero igualmente nocivas. Un ensayo muy utilizado para caracterizar desde este punto de vista el agregado fino es el denominado Equivalente de Arena. (INV E-133)

- ❖ **Densidad y estabilidad:** La estabilidad de una mezcla de agregados depende de diversos factores como son la granulometría, forma de las partículas, densidad, fricción interna y cohesión. Para que un material sea muy estable debe presentar alta fricción interna para poder resistir las cargas, pero a su vez la fricción interna depende de diversos factores como son la densidad, forma de la partícula y la granulometría. De dichas propiedades la granulometría es la mas importante en cuanto a su fracción de finos y gruesos que componen la el

material, cuando nos referimos a material fino estamos hablando de aquel material que hace parte de la mezcla el cual pasa el tamiz N° 200.

Cuando los agregados contienen pocos a nada de finos y están bien gradados obtienen su estabilidad por medio del contacto grano a grano. Un agregado sin finos tiene una densidad relativa baja pero es permeable. Sin embargo, este material es difícil de manipular durante el proceso de compactación.

Si el agregado esta formado por suficientes finos los cuales son capaces de llenar los vacíos entre los granos de agregado esto hace que se mantenga la resistencia la contacto con los granos pero con una mayor resistencia a la deformación. La densidad de este material es alta y su permeabilidad es baja, este no es tan difícil de compactar pero es muy estable tiene una resistencia buena en condiciones confinadas y no confinadas.

Pero cuando un material contiene muchos finos no hay contacto grano a grano y el agregado simplemente flota en el suelo, su densidad es baja su permeabilidad es casi nula, la estabilidad se afecta por el agua y extrañamente este material a veces es fácil de manejar durante la construcción y la compactación.

- ❖ **Ausencia de partículas o sustancias nocivas:** Las sustancias perjudiciales que pueden estar presentes en los agregados son: suelos finos (limos o arcillas) estas debilitan la adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de agregado, perjudicando la resistencia y la durabilidad la estructura. Impurezas orgánicas (material vegetal en descomposición) las cuales pueden interferir en las reacciones químicas como son el fraguado, hidratación, etc. Carbón de piedra, lignitos y partículas livianas o blanda estos pueden disminuir la resistencia y afectar la durabilidad de la estructura. La mayor parte de las

especificaciones limitan las cantidades permisibles de estas sustancias. (INV E-133)

- ❖ **Estabilidad química:** Ciertos agregados pueden ser inadecuados para una aplicación particular en la construcción de carreteras, debido a la composición química de las partículas del agregado. En la mezcla de asfalto, ciertos agregados que tienen una afinidad excesiva por el agua pueden contribuir a que se levante o remueva el asfalto, lo que conlleva a la desintegración de la superficie de asfalto.

Para juzgar la resistencia relativa a la remoción de asfaltos de los agregados se han utilizado varios procedimientos de laboratorio siendo los mas destacados, la prueba de remoción de asfaltos y la prueba de inmersión-compresión

Nota: En Colombia el Instituto Nacional de Vías, hace las siguientes recomendaciones sobre las granulometrías y demás requerimientos de los agregados para su uso en afirmados, bases y subbases:

Figura 25. Franjas granulométricas del material de afirmado

Tamiz (mm.)		Porcentaje que pasa	
		A-1	A-2
37.5 mm.	1 ½"	100	-
25.0 mm.	1"	-	100
19.0 mm.	¾"	80-100	90 – 100
9.5 mm.	3/8"	60 - 85	65 – 90
4.75 mm.	Nº 4	40 - 65	45 – 70
2.0 mm.	Nº 10	30 – 50	35 – 55
425 µm.	Nº 40	13 - 30	15 – 35
75 µm.	Nº 200	9 - 18	10 – 20

Fuente: Intitulo Nacional de Vías (INVIAS) 311-07.

Simultáneamente con el cumplimiento del requisito granulométrico de la Tabla 4, se deberán satisfacer las siguientes relaciones:

$$0.20 < \frac{\% \text{ pasa tamiz N}^\circ 200}{\% \text{ pasa tamiz N}^\circ 10} < 0.45 \quad \%$$

$$16 \leq \{[(\% \text{ pasa tamiz de 1"})-(\% \text{ pasa tamiz N}^\circ 10)] * [\% \text{ pasa tamiz N}^\circ 4]\} \leq 34$$

$$100 \leq [(\% \text{ de contracción lineal}) * (\% \text{ pasa tamiz N}^\circ 40)] \leq 240$$

Tabla 3. Franjas granulométricas del material de subbase

Tamiz (mm.)		Porcentaje que pasa	
		SBG-1	SBG-2
50.0 mm	2"	100	-
37.5 mm.	1 1/2"	70 -95	100
25.0 mm.	1"	60 - 90	55 – 85
19.0 mm.	1/2"	45 - 75	55 – 85
9.5 mm.	3/8"	40 - 70	45 – 75
4.75 mm.	Nº 4	25 – 55	30 – 60
2.0 mm.	Nº 10	15 - 40	20 – 45
425 µm.	Nº 40	6 - 25	8 – 30
75 µm.	Nº 200	2 - 15	2 – 15

Fuente: Intitulo Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 330-07.

Tabla 4. Franjas de granulométrica del material de base granular.

Tamiz (mm.)		Porcentaje que pasa	
		BG-1	BG-2
37.5 mm.	1 ½"	100	-
25.0 mm.	1"	70 -100	100
19.0 mm.	¾"	60 - 90	70 – 100
9.5 mm.	3/8"	45 - 75	50 – 80
4.75 mm.	Nº 4	30 - 60	35 – 65
2.0 mm.	Nº 10	20 – 45	20 – 45
425 µm.	Nº 40	10 - 30	10 – 30
75 µm.	Nº 200	5 - 15	5 – 15

Fuente: Intitulo Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 330-07.

Tabla 5. Requisitos de los materiales para afirmados, subbases granulares y bases granulares

Ensayo	Norma de ensayo INV	NT1			NT2			NT3	
		Afirmado	Subbase granular	Base granular	Afirmado	Subbase granular	Base granular	Subbase granular	Base granular
Composición									
Granulometría	E-213	Tabla 6	Tabla 4	Tabla 5	Tabla 6	Tabla 4	Tabla 5	Tabla 4	Tabla 5
Dureza									
Desgaste en la maquina de los Ángeles (gradación A)	E-218	≤ 50	≤ 50	≤ 40	≤ 50	≤ 50	≤ 40	≤ 50	≤ 35
- En seco, 500 revoluciones (%)		-	-	≤ 8	-	-	≤ 8	-	≤ 7
- En seco, 100 revoluciones (%)		-	-	≤ 55	-	-	≤ 55	-	≤ 50
- Después de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones (%)		-	-	≤ 2	-	-	≤ 2	-	≤ 2
- Relación humedad/ seco, 500 revoluciones									
Desgaste en el equipo Micro-Deval (%)	E-238	-	-	-	-	≤ 35	≤ 30	≤ 30	≤ 30
Evaluación de la resistencia por el método de 10% de fino.									
-Valor en seco (kN)	E-224	-	-	-	-	-	≥ 70	-	≥ 90
-Relación húmedo /seco (%)		-	-	-	-	-	≥ 75	-	≥ 75
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales (%)	E-211	-	≤ 2	≤ 2	-	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Durabilidad									
Perdidas en el ensayo de solidez en sulfatos	E-220	≤ 12	≤ 12	≤ 12	≤ 12	≤ 12	≤ 12	≤ 12	≤ 12
- sulfatos de sodio (%)		≤ 18	≤ 18	≤ 18	≤ 18	≤ 18	≤ 18	≤ 18	≤ 18
- sulfato de magnesio (%)									
Limpieza									
Limite líquido (%)	E-125	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 40	≤ 40	-	≤ 40	-
Índice plástico (%)	E-126	4-9	≤ 6	≤ 3	4-9	≤ 6	0	≤ 6	0
Equivalente de arena (%)	E-133	-	≥ 25	≥ 30	-	≥ 25	≥ 30	≥ 25	≥ 30
Valor de azul de metileno	E-235	-	-	≤ 10	-	-	≤ 10	-	≤ 10
Contracción lineal	E-127								
Geometría de las partículas									
Índice de alargamiento y aplanamiento (%)	E-230	-	-	≤ 35	-	-	≤ 35	-	≤ 35
Porcentaje de caras fracturadas	E-227	-	-	≥ 50	-	-	≥ 50	-	≥ 60
Angularidad de la fracción fina (%)	E-239	-	-	-	-	-	≥ 35	-	≥ 35
Resistencia del material									
CBR (%) Nota: porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión. Método D.	E-148	≥ 15	≥ 30	≥ 80	≥ 15	≥ 30	≥ 80	≥ 30	≥ 100

(*) El ensayo de Valor de azul de metileno solo será exigido cuando el equivalente de arena del material de base granular sea inferior a treinta (30), pero igual o superior a veinticinco (25)

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 300-07

3.2. BASES ESTABILIZADAS

Debido a que a veces los materiales disponibles para construcción de vías no llenan los requisitos de resistencia y durabilidad indispensable para su uso, es necesario mejorarlos usando algún método de estabilización. Por esta razón el INVIAS hace las siguientes recomendaciones para la estabilización con cemento portland y emulsión asfáltica, para materiales empleados en bases que presentan algún tipo de problema.

3.2.1. Estabilización de bases con cemento portland

El cemento para estabilización será portland tipo I (Destinado a obras de concreto hidráulico en general, al que no se le exigen propiedades especiales) y el material por estabilizar con este cemento puede ser el proveniente de la escarificación de la capa superficial existente, o ser un suelo natural proveniente de excavaciones o zonas de préstamo, o agregados locales de baja calidad, o escorias, o mezclas de ellos. El material, ya combinado, deberá estar libre de materia orgánica u otra sustancia que pueda perjudicar el correcto fraguado del cemento y además deberá, cumplir los requisitos generales que se indican a continuación:

Tabla 6. Requisitos de los materiales para la construcción de bases estabilizadas con cemento Portland.

Ensayo	Norma de Ensayo INV	Requisito
Limpieza		

Ensayo	Norma de Ensayo INV	Requisito
Nota 1 Limite liquido; % máx.	E-125	35
Nota 1 Índice de plasticidad; % máx.	E-125 E-126	15
Reactividad		
Proporción de sulfatos de material combinado, expresada como SO ₄ =, % máx.	E-233	0.5

Nota 1 Estos valores pueden ser mayores si se dispone de un equipo con la capacidad de disgregación suficiente para conseguir una mezcla homogénea de un suelo más plástico, con el cemento.

Tabla 7. Requisitos granulométricos del material para la construcción de bases estabilizadas con cemento Portland

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alterno	
4.75 mm	Nº 4	Mínimo 60
75 µm	Nº 200	Máximo 50

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 341-07.

Tabla 8. Requisitos químicos del cemento Portland

PARÁMETRO	Cemento Portland tipo I
Oxido de magnesio (MgO), máx. %	6.0
Cuando (C ₃ A) ^e es 8 % o menor	3.0
Cuando (C ₃ A) ^e es mayor que 8%	3.5
Perdida al fuego, máx. %	3.0
Residuo insoluble, máx. %	0.75

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 501-07.

Tabla 9. Requisitos físicas del cemento Portland

ENSAYO	TIPO I
Contenido de aire del mortero, % en volumen (Norma INV E-328)	
Máximo	12.0
Mínimo	-
Finura Método del turbidímetro (m²/Kg.). (Norma INV E-303)	
Valor medio, mínimo	160.0
Valor mínimo, un solo resultado	150.0
Valor medio, máximo	220.0
Valor máximo, un solo resultado	230.0
Valor máximo, un solo resultado Ensayo de permeabilidad al aire (Norma INV E-302)	
Valor medio, mínimo	280.0
Valor mínimo, un solo resultado	260.0
Valor medio, máximo	400.0
Valor máximo, un solo resultado	420.0
Expansión en autoclave, % máximo (Norma INV E-304)	0.8
Resistencia a la compresión MPa/ (psi) (Norma INV E-323)	
3 días	12 (1740)
7 días	19 (2760)
Tiempo de fraguado Gillmore (Norma INV E-306)	
Tiempo inicial, en minutos valor mínimo	60.0
Tiempo final, en minutos valor máximo	600.0
Tiempo de fraguado Vicat (Norma INV E-305)	
Tiempo inicial, en minutos valor mínimo	45.0
Tiempo final, en minutos valor máximo	375.0

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 501-07.

3.2.2. Estabilización de bases con emulsión asfáltica

Los materiales por estabilizar podrán ser agregados pétreos o suelos naturales, cuyas características básicas se indican a continuación. Los agregados pétreos podrán ser utilizados en la construcción de bases estabilizadas para todo tipo de

transito, en tanto que los suelos solo se podrán emplear en la construcción de bases estabilizadas en proyectos con nivel de transito bajo.

Los agregados pétreos podrán provenir de diversas fuentes como son: la trituración de piedra de cantera o de grava, de fuentes de grava natural o simplemente ser una mezcla de ambos. Pero sin importar su procedencia estos materiales deben estar libres de material orgánico, terrones de arcilla o cualquier otra sustancia que pueda ser un problema para el buen comportamiento de la capa estabilizada. Así mismo el agregado pétreo por estabilizar deberá tener una gradación que se ajuste a alguna de las franjas indicadas a continuación en la tabla 10.

Tabla 10. Gradaciones de agregados para construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica.

Tamiz		Porcentaje que pasa	
Normal	Alternativo	BEE-1	BEE-2
37.5 mm	1 1/2"	100	-
25 mm	1"	70-100	100
12.5 mm	1/2"	50-80	60-90
9.5 mm	3/8"	45-75	50-80
4.75 mm	No. 4	30-60	30-60
2.36 mm	No. 8	20-45	20-45
425 µm	No. 40	10-27	10-27
150 µm	No. 100	5-18	5-18
75 µm	No. 200	3-15	3-15

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 340-07.

En adición a los requisitos de granulometría de la Tabla 10, la relación de polvo (% pasa tamiz 75 µm (No 200) / % pasa tamiz 425 µm (No 40)) no deberá exceder de

2/3. Además, el producto del porcentaje que pasa el tamiz de 75 μm (No. 200) del agregado combinado por su índice de plasticidad, no podrá ser mayor de (72).

Los agregados también deberán cumplir los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 11.

Tabla 11. Requerimientos de los agregados pétreos para la construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica.

Ensayo		Norma de ensayo INV	Requisito
Dureza			
Desgaste en los Ángeles (gradación A)	<ul style="list-style-type: none"> - En seco, 500 revoluciones, % máx. - en seco, 100 revoluciones; % máx. - Después de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones, % máx. - Relación húmedo/seco, 500 revoluciones. máx. 	E-218	50 10 70 2
Micro-Deval	- Agregado grueso, % máximo	E -238	45
10% de finos	<ul style="list-style-type: none"> - Valor en seco, kN mínimo - Relación húmedo/seco, % mínimo 	E-224	30 50
Durabilidad			
Perdidas en el ensayo de solidez en sulfatos, % máx.	<ul style="list-style-type: none"> - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio 	E – 220	12 18
Limpieza			
Limite liquido, % máximo		E – 125	35
Índice de plasticidad, % máximo		E – 126	7
Equivalente de arena, % mínimo		E – 133	20
Terrones de arcilla y partículas deleznable, % máximo		E – 211	2
Capacidad de soporte			

Ensayo	Norma de ensayo INV	Requisito
CBR del material sin emulsión asfáltica, % mínimo. Nota: Porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión. Método D.	E – 148	20

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 340-07.

En el caso de que lo que se necesite estabilizar sea un suelo, se podrán emplear suelos granulares finos de los tipos A-1-b y A-2-4, que sean pulverizables o disgregables económicamente, que se encuentren exentos de cantidades perjudiciales de materia orgánica, arcilla plástica, materiales micáceos y cualquier otra sustancia inapropiada.

Tabla 12. Requisitos de los suelos aptos para la construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica

Ensayo	Norma de ensayo INV	Requisito
Limpieza		
Índice de plasticidad, % máx.	E-125 E-126	7
Equivalente de arena - Suelos A-1-b, % mínimo - Suelos A-2-4, intervalo admisible, en %	E-133	≥ 90 20 – 40
Capacidad de soporte		
CBR del suelo sin estabilizar, % mínimo Nota: Porcentaje asociado al 95% de la densidad seca máxima, medida según la norma de ensayo INV-142	E – 148	15

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 340-07.

La granulometría del material pulverizado, listo para estabilizar, deberá ajustarse a los límites señalados en la Tabla 13.

Tabla 13. Gradación de suelos para la construcción de bases estabilizadas con emulsión asfáltica

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alternativo	BEE-3
4.75 mm	No. 4	100
75 μ m	No. 200	5-25

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 340-07.

El material bituminoso que se empleara será una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta, que corresponda a los tipos CRL-1 o CRL-1h, que cumpla los requisitos de calidad establecidos en la tabla 17.

Pero se debe tenerse en cuenta que las bases estabilizadas con material asfáltico pueden presentar defectos de adhesión, lo cual indica la quiebra de las fuerzas de unión entre el agregado y su cubierta de conglomerante asfáltico, lo que conduce a una separación física, una posible consecuencia de los defectos de adhesión, es el fallo mecánico por desgaste y desflecado de la superficie, pero el fallo mecánico no se produce inmediatamente después del fallo de adhesión, sin el desprendimiento, aunque sea permanente, se produce a un nivel inferior de la construcción y el grado de entrecruzamiento físico de las partículas de agregado es suficiente para resistir el esfuerzo del tráfico. Dado que el desprendimiento es un fenómeno asociado a la presencia de agua. Se deduce que los pavimentos

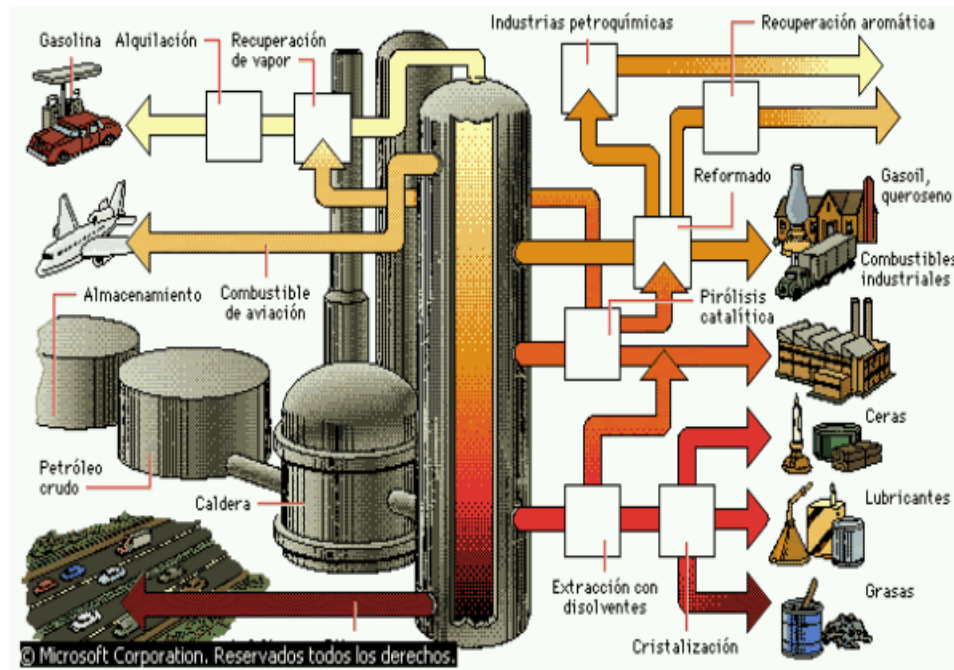
densos, de bajo contenido de huecos, son prácticamente inmunes a este tipo de problema.

3.3. LIGANTES ASFÁLTICOS

Los asfalto son materiales que se pueden presentar de forma natural o artificial, el asfalto natural es aquel que se obtiene de rocas y lagos asfálticos, mientras que los asfaltos artificiales son el producto de la destilación del petróleo. Debido a las diferentes propiedades que presentan los asfaltos, tales como: consistencia, impermeabilidad, adherencia, entre muchas otras, se han convertido en uno de los elementos más importante para la construcción de pavimentos.

Por lo general la presentación de los asfaltos es de forma semisólida o sólida a temperatura ambiente, para poderlos trabajar es necesario aumentar su temperatura y así poder disminuir su consistencia a un valor admisible para mejorar sus propiedades de manejabilidad y poderlos usar en diversas tareas como: para bombearlo, para el envolvimiento de agregados, riegos asfálticos, producción de mezclas asfálticas en caliente, entre otros.

Figura 26. Proceso industrial para refinar el petróleo



Fuente: Cartilla práctica para el manejo de los asfaltos colombianos. Instituto Colombiano del Petróleo, ECOPETROL y Universidad del Cauca. 1994

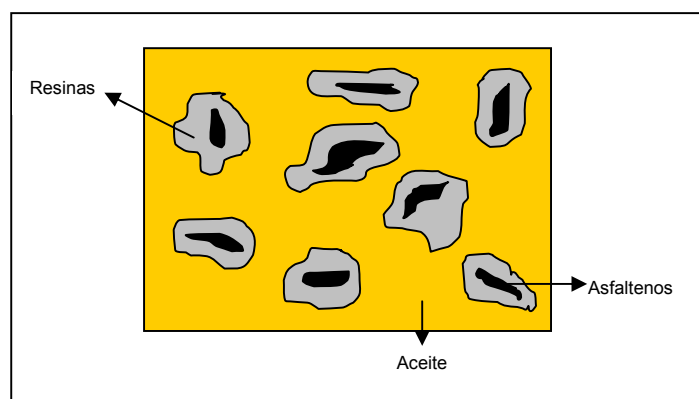
3.3.1. Asfaltos.

Los asfaltos son un producto de gran calidad, sobre el que se fundamenta gran parte de la construcción de los pavimentos flexibles, en virtud de este dúctil, maleable y tenaz material que los conforma e identifica. Los asfaltos son materiales aglomerantes de color negro brillante, los cuales están conformados por una mezcla compleja de hidrocarburos de peso molecular elevado cuyos componentes principales son el carbono y el hidrógeno y en mucha menor

proporción oxígeno, azufre, nitrógeno y metales pesados como el níquel y el vanadio, todos de diferente peso molecular, solubles en sulfuro de carbono, que forman una solución coloidal, en la que la fase discontinua la constituye la fracción pesada, denominada asfaltenos los cuales son las partículas sólidas, cuyo color va desde café oscuro hasta negro, estos son los responsables de las características estructurales y de dureza de los asfaltos.

La fase continua esta formada por un fluido aceitoso el cual esta compuesto por la fracción ligera, denominada maltenos. A su vez la parte malténica puede subdividirse en tres fracciones principales, parafinas, resinas que son mas pesadas que los aceites, tiene un punto de ebullición mas elevado y además presentan mayor poder de absorción, estas son de color ámbar o pardo, proporcionan las propiedades cementantes o aglutinantes y los aceites aromáticos, los cuales son líquidos poco viscoso, de color claro, no adherentes y muy estables; el asfalto debe gran parte de su deformabilidad a la fracción ligera, sobre todo a los aceites, ya que estos brindan la consistencia necesaria para poder trabajar los asfaltos, y específicamente actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y resinas.

Figura 27. Composición química de los asfaltos



Algunas de las propiedades más importantes de los asfaltos son: que es un material termoplástico, es decir, su estado depende de la temperatura, así: en ambiente fríos se comporta como un sólido elástico, a temperaturas intermedias presenta un condición visco-elástica y a medida que se eleva la temperatura pasa a ser un material de flujo plástico muy viscoso. Además de esto, presenta un alto grado de adhesividad e impermeabilidad, es resistente a la mayoría de los ácidos, sales alcalis, su durabilidad es muy alta en condiciones normales, es adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. También es importante tener en cuenta algunas Ventajas de los asfaltos como son:

- Resistente al ataque químico y bacteriológico.
- Se puede aplicar sobre la mayoría de las superficies.
- Las propiedades del material permiten que se adhiera o integre a la superficie impermeabilizada, evitando que se levante por cambios bruscos de temperatura o dilataciones que se puedan presentar por diferentes motivos
- Proporcionar una íntima cohesión entre los agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por cargas de los vehículos.
- Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.
- Mejorar la capacidad de soporte de la estructura, permitiendo disminuir el espesor, este material es el único que garantiza en mayor grado, la satisfacción simultánea y económica de estas dos funciones, lo que además proporciona una estructura de pavimento con características flexibles.

Cabe mencionar que no todos los crudos del petróleo proporcionados por refinerías, son aptos para la construcción de pavimentos flexibles, como sucede con los crudos de la base parafínica los cuales están constituidos

fundamentalmente por hidrocarburos saturados, que requieren un proceso complementario de oxidación parcial. Los mejores asfaltos se pueden obtener a partir de los crudos de base nafténica, son los constituidos fundamentalmente por hidrocarburos no saturados. El comportamiento reológico de los asfaltos depende de su composición química, la cual depende a su vez de su fuente de procedencia y del proceso de refinación.

3.3.2. Propiedades de los ligantes asfálticos.

A continuación se presentan algunas de las propiedades físicas de los ligantes asfálticos que los hacen tan apreciables en el campo del diseño, construcción y mantenimiento de las vías de comunicación.

- ❖ **Susceptibilidad térmica:** Para poner en obra un material asfáltico, se requiere que tenga una viscosidad baja, lo cual puede conseguirse por medio de una disolución en un disolvente volátil, por emulsión en agua o por un aumento en la temperatura, siendo éste último el procedimiento frecuentemente utilizado. La Susceptibilidad térmica de un producto asfáltico, es la capacidad que presenta el material asfáltico, para variar su viscosidad en función de la temperatura. Es muy importante la susceptibilidad debido a que se puede conocer la temperatura adecuada para que el producto asfáltico adquiera la viscosidad requerida para el uso que se le desee dar.

- ❖ **Poder aglomerante:** Los ligantes asfálticos tienen la propiedad de bajar su viscosidad con la temperatura, de tal modo que se convierte en una sustancia fluida que moja, se adhiere y envuelve con mucha facilidad a los agregados pétreos y a los materiales granulares, al tiempo que los aglomera. Este poder aglomerante del asfalto aumenta al enfriarse y además al compactar el material

se aumenta la superficie de contacto entre las partículas, dando lugar a una mezcla asfáltica de características particulares para la construcción de cada una de las diferentes capas del firme, en especial, de base, intermedia y rodadura.

- ❖ **Agente estabilizante:** Los ligantes asfálticos al ser usados como estabilizadores en materiales granulares, dan como resultado una alta estabilidad, la cual permiten dar dureza, cohesión y resistencia a los materiales granulares sueltos, al igual que lo pueden hacer otros agentes estabilizadores como: el cemento, la cal y diferentes conglomerantes hidráulicos.

Además los ligantes asfálticos se caracterizan por que su comportamiento depende fundamentalmente de la temperatura y del tiempo de aplicación de la carga, pueden asumir deformaciones pequeñas por largos periodos de tiempo permitiendo adaptarse a los pequeños asentos y deformaciones que experimentan las capas inferiores del firme.

El poder aglomerante y estabilizante del asfalto se ve también considerablemente modificado y mejorado al mezclarse con el filler. Pero la mejora de dichas propiedades no es uniforme debido a que depende del tipo de filler involucrado en la mezcla, la irregularidad geométrica como (la forma, angulosidad, textura de superficie), la adsorción y adhesión de los materiales.

- ❖ **Agente impermeabilizante:** Los ligantes asfálticos recubren a los materiales granulares a través de una capa impermeable haciendo inaccesible el paso del agua, al mismo tiempo se logra conseguir el relleno de los huecos dejados por el material granular, con lo que se obtienen materiales con valores de impermeabilidad muy altos.

La impermeabilidad de los materiales asfálticos es una de sus características más reconocidas, la cual se debe, en primer lugar, a que la solubilidad del agua en dichos materiales es muy pequeña y, además, a la elevada viscosidad de tales productos. En general, cuanto menor es la penetración de un producto asfáltico, más lentamente se difunde el agua a través de él.

- ❖ **Manejabilidad:** Los materiales tratados con ligantes asfálticos son fácilmente manejables, lo cual contribuye a hacer más fácil los procesos constructivos de las diversas estructuras de pavimento.
- ❖ **Durabilidad:** Mide que tanto puede el asfalto conservar sus características, se juzga principalmente a través del comportamiento del asfalto con el transcurso del tiempo. Esta propiedad es afectada por el diseño de la mezcla, las características del agregado y la mano de obra en la construcción.
- ❖ **Densidad:** La densidad de un asfalto ayudar a reconocer el tipo de impurezas que contiene un producto y su medida nos sirve de control de la uniformidad de un suministro. Los valores más altos de densidad de un asfalto corresponden a los asfaltos procedentes de crudos con un alto contenido de hidrocarburos aromáticos
- ❖ **Ductilidad:** Los materiales asfálticos están sometidos frecuentemente a variaciones de temperatura que le provocan cambios dimensionales, para esto es necesario que el material asfáltico tenga suficiente ductilidad para alargarse sin que se produzcan grietas. Una ductilidad excesiva tampoco es conveniente debido a que se corre el riesgo de que se presenten ondulaciones por efectos de las cargas del tráfico.

Puede comprobarse experimentalmente que para un mismo material, la ductilidad crece cuando crece la temperatura, y para materiales distintos, pero

del mismo tipo, la ductilidad aumenta cuando la penetración aumenta o cuando la viscosidad disminuye. (INV E-702)

- ❖ **Consistencia:** Para caracterizar a los asfaltos es necesario conocer su consistencia a distintas temperaturas, puesto que son materiales termoplásticos que se licuan gradualmente al calentarlos. Consistencia es el término usado para describir el grado de fluidez o plasticidad del asfalto a cualquier temperatura dada. Para poder comparar la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro, es necesario fijar una temperatura de referencia. Comúnmente, para especificar y medir la consistencia de un asfalto para pavimento, se usan ensayos de viscosidad o de penetración
 - ✓ *Penetración:* La penetración es una medida de la consistencia del producto asfáltico, la cual por si sola, no nos permite identificar un asfalto, pero sí define si el producto que está sometido al ensayo es líquido, semisólido o sólido. La penetración de un producto asfáltico disminuye cuando la densidad del mismo aumenta (E-706 Penetración de los materiales asfálticos).
 - ✓ *Viscosidad:* Esta propiedad de los ligantes asfálticos, ayuda a conocer la temperatura en la cual el asfalto es de fácil manejo. Además la viscosidad de un ligante es una de sus características esenciales desde el punto de vista de su comportamiento en el momento de su aplicación cuando su consistencia es suficientemente reducida. La viscosidad de los ligantes hidrocarbonatos depende de la temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una buena idea de cuál es su susceptibilidad térmica. (E-714 Viscosidad Saybolt de asfaltos, E-715 Viscosidad cinemática de asfaltos, E-716 Viscosidad del asfalto con el método del viscosímetro capilar de vacío y E-717 Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional)

- ❖ **Punto de Inflamación:** Es la temperatura a la cual arden los vapores del asfalto al aproximar a la superficie del material una llama de prueba. Es una característica muy importante de los asfalto, ya que puede contribuir a evitar posibles accidentes en el momento de su uso, debido a que se puede producir espuma o despedir vapores los cuales puede constituir un riesgo para la seguridad de la gente en general, por lo tanto se requiere que el asfalto no produzca ninguno de dichas dificultades, por lo menos hasta las temperaturas de trabajo. (E-709 Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland y E-710 Punto de ignición mediante la copa abierta Tag)

- ❖ **Volatilidad:** Indica la cantidad de aceites volátiles que contiene un asfalto, mediante calentamiento a una temperatura determinada durante un cierto tiempo. Esta propiedad muestra un índice de inalterabilidad del asfalto durante las operaciones previas a su puesta en obra.

- ❖ **Solubilidad:** El resultado de este ensayo nos permitiría juzgar la cantidad de asfalto puro que contiene dicho material. Por otro lado, la propiedad de solubilidad, sirve para comprobar la uniformidad de composición de un producto de este tipo y para determinar la cantidad de asfalto de que consta un pavimento.

- ❖ **Fragilidad:** La fragilidad estática, se caracteriza por la rotura de un material en cuanto se sobrepasa su límite elástico y sin que haya sufrido una deformación plástica apreciable. Un material que sufre deformaciones lentas de carácter plástico puede romperse bajo el efecto de un choque, cuando esto ocurre se dice entonces que el material no tiene tenacidad.

- ❖ **Cohesión:** Esta propiedad indica la dificultad de un producto asfáltico o de una mezcla de productos asfálticos y un agregado pétreo para romperse por

tracción sin que falle la adherencia entre el producto asfáltico y el agregado pétreo.

- ❖ **Adherencia:** Está representada la resistencia que muestra un producto asfáltico a despegarse de un agregado, pero esta adherencia no puede tener lugar más que si el agregado mineral es mojado por el asfalto. Además de esto, tiene que existir afinidad entre las moléculas de uno y de otro cuerpo.
- ❖ **Envejecimiento:** El asfalto está compuesto por moléculas orgánicas que reaccionan con el oxígeno del aire oxidándose lo que les hace más duros y frágiles. Este envejecimiento oxidativo se produce de forma muy lenta cuando el asfalto está en el pavimento, aunque este proceso es más rápido cuando las temperaturas a las que se ven sometido son mayores.

Se debe tener en cuenta también que gran parte de este envejecimiento o endurecimiento oxidativo tiene lugar antes de que el asfalto esté compactado, durante el proceso de mezcla en el que el ligante está sometido a altas temperaturas y en forma de película fina sobre la superficie, lo que hace que el proceso sea más rápido, pudiéndose producir en este periodo otros tipos de envejecimiento, como la pérdida de los componentes más volátiles del asfalto, que se traduce también en un endurecimiento del mismo.

3.3.3. Tipos de ligantes asfálticos.

A continuación se presentan los diferentes tipos de asfaltos empleados en los pavimentos bituminosos, su clasificación y los ensayos más comunes sobre asfaltos para pavimentos:

- ❖ **Asfaltos oxidados o soplados:** Estos son asfaltos sometidos a un proceso de deshidrogenación y luego a un proceso de polimeración. A elevada temperatura se le hace pasar una corriente de aire con el objetivo de mejorar sus características y adaptarlos a aplicaciones más especializadas. El proceso de oxidación puede producir en los asfaltos las siguientes modificaciones físicas: Aumento del peso específico, aumento de la viscosidad y disminución de la susceptibilidad térmica.

- ❖ **Asfaltos sólidos o duros:** Asfaltos con una penetración a temperatura ambiente menor que 10. Además de sus propiedades aglutinantes e impermeabilizantes, posee características de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la acción de la mayoría de los ácidos, sales y alcoholes.

- ❖ **Asfalto fluxado:** Se han desarrollado para aplicaciones muy específicas, en los cuales el fluxante no es un derivado del petróleo sino que proviene del proceso de destilación de la hulla. Su viscosidad ha sido reducida por el empleo de un aceite fluidificante.

- ❖ **Asfaltos fillerizados:** Este tipo de asfalto se caracteriza por que contienen materias minerales finamente molidas que pasan por el tamiz # 200.

- ❖ **Asfaltos líquidos:** También denominados asfaltos rebajados o cut-backs, Se obtienen por disolución de los mismos en un aceite o fluidificante, teniendo por lo tanto una viscosidad reducida, se desarrollaron para facilitar el empleo de los asfaltos cuando las temperaturas o el tipo de tratamiento exigen viscosidades de aplicación menores que la que aún calentando fuertemente, puedan tener los asfaltos normalmente. Su viscosidad ha sido reducida por la adición de un fluidificador volátil.

Están compuestos por una fase asfáltica y un fluidificante volátil, que puede ser bencina, queroseno o aceite. El fluidificante por lo general, no es más que un aditivo, que se elimina posteriormente por evaporación y que sirve para facilitar la puesta en obra, quedando al final el asfalto únicamente el cual envuelve y cohesiona las partículas del agregado. En el proceso de eliminación del fluidificante o llamado también proceso de curado, se pierde un producto de alto valor. Lo que supone una fuente de contaminación atmosférica, así como riesgos de inflamación por el carácter de los fluidificantes empleados. Son asfaltos líquidos los siguientes productos:

- ✓ *Asfalto de curado rápido:* Cuando el disolvente es del tipo de la nafta o gasolina, se obtienen los asfaltos rebajados de curado rápido y se designan con las letras RC (Rapid Curing), seguidos por un número que indica el grado de viscosidad cinemática en Centiéstokes. En Colombia el más utilizado es el RC-250.
 - ✓ *Asfalto de curado medio:* Si el disolvente es queroseno, se designa con las letras MC (Medium Curing), seguidos con un número que indica el grado de viscosidad cinemática medida en centiéstokes. En Colombia el más utilizado es el MC-70.
 - ✓ *Asfalto de curado lento:* Su disolvente o fluidificante es aceite liviano, relativamente poco volátil usualmente de tipo Fuel-oil y se designa por las letras SC (Slow Curing), seguidos con un número que indica el grado de viscosidad cinemática medida en centiéstokes.
- ❖ **Cementos asfálticos:** El cemento asfáltico es un producto bituminoso semi-sólido a temperatura ambiente, preparado a partir de hidrocarburos naturales mediante un proceso de destilación. El producto que se obtiene en el fondo de la torre de destilación, posterior a la extracción de los componentes livianos, son los elementos con los cuales se prepara el cemento asfáltico el cual

contiene una proporción muy baja de productos volátiles, posee propiedades aglomerantes y es esencialmente soluble en tricloroetileno.

Los procesos de refinación para la obtención de asfaltos, dependen del rendimiento en asfalto que presenta el petróleo. En los petróleos que presentan bajo rendimiento, se utiliza la destilación en dos etapas: una a presión atmosférica, seguida de otra al vacío. Si el rendimiento del asfalto es alto, basta la etapa de destilación al vacío.

El proceso mas usado es el de destilación en dos etapas; pues produce asfaltos normalmente sin necesidad de instalaciones especiales. Consiste en una separación física de varios constituyentes del petróleo, por la diferencia de sus puntos de ebullición y condensación.

El crudo es bombeado a una unidad, calentado convenientemente y entra a la torre de destilación atmosférica donde es parcialmente vaporizado. Las fracciones más livianas se evaporan sobre la torre. La diferencia de temperatura a lo largo de la torre, provoca la condensación de esos vapores, formando corrientes líquidas, las que son retiradas lateralmente como productos específicos. Las fracciones mas pesadas permanecen en estado, líquido escurriendo al fondo de la torre, constituyendo la carga para la torre de fraccionamiento al vacío, después de un nuevo calentamiento.

En ésta torre las condiciones de operación permiten concentrar el residuo asfáltico y las variaciones de éstas condiciones permiten el ajuste de la penetración del residuo.

La penetración de un asfalto procesado es baja, con un aumento de la temperatura o vacío en la torre de fraccionamiento. Inversamente, temperaturas y vacíos menores producen asfaltos con penetraciones más

altas. El asfalto procesado se denomina cemento asfáltico de petróleo y para su clasificación se emplean en general tres métodos:

➤ *Con base en su penetración.*

Los cementos asfálticos se designan por las letras CA y se clasifican según su grado de dureza o consistencia, lo cual se mide a través de un ensayo de penetración en décimas de milímetros. Es así como podemos distinguir los siguientes tipos de cemento asfáltico.

Figura 28. Ensayo de penetración



- ✓ **AC 40-50:** Cementos asfálticos con penetración entre 40 y 50 décimas de milímetro. Estos son los de grado mas duro y presentan una consistencia tal que a temperatura ambiente el dedo solamente es capas de producir una pequeña huella superficial.

- ✓ **AC 60-70:** Cementos asfálticos con penetración entre 60 y 70 décimas de milímetro.

- ✓ **AC 85-100:** Cementos asfálticos con penetración entre 85 y 100 décimas de milímetro. Este es el grado mas empleados en los pavimentos asfálticos corrientes.
- ✓ **AC 120-150:** Cementos asfálticos con penetración entre 120 y 150 décimas de milímetro.
- ✓ **AC 200-300:** Cementos asfálticos con penetración entre 200 y 300 décimas de milímetro. Estos son los más blandos, son moderadamente firmes a temperatura ambientes y el dedo penetra fácilmente en ellos.

Nota: Sin embargo, es conveniente aclarar que en Colombia solo se utilizan dos tipos de asfalto, provenientes de Barrancabermeja y Cartagena; los cuales son: AC 60-70 y AC 80-100.

➤ *Con base en su viscosidad*

Permite conocer los valores de la resistencia del asfalto a fluir. Este ensayo se puede realizar a temperaturas de 60°C o de 135°C. A 60°C se efectúa la viscosidad absoluta y se utiliza un viscosímetro capilar, el cual se coloca en un baño de aceite a temperatura constante. Se incorpora el asfalto precalentado hasta que llegue a la marca de llenado.

Una vez que el sistema ha alcanzado la temperatura de 60°C, se aplica un vacío y se mide el tiempo en que tarda en desplazarse el asfalto por el capilar entre dos marcas consecutivas. Al multiplicarse este tiempo por el factor de calibración de viscosímetro, se obtiene el valor de la viscosidad absoluta en Poises. A temperatura de 135°C se realiza el ensayo de viscosidad cinemática y sus unidades son en centistokes.

Tabla 14. Ensayo de viscosidad

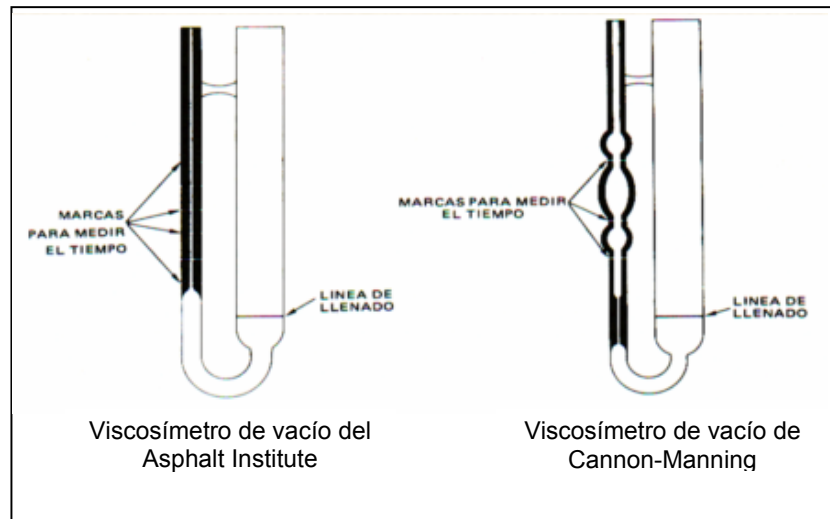


Tabla 15. Clasificación de asfaltos Mexicanos

Asfalto	Viscosidad a 60°C, Pa s	Viscosidad a 60°C, Poises
AC-5	50±10	500±100
AC-10	100±20	1000±200
AC-20	200±20	2000±400
AC-30	300±60	3000±600

Fuente: 1^{er} Seminario Latinoamericano de ASFALTO, Cartagena 2004, Colombia.

➤ Con base en su comportamiento o Superpave

Las pruebas Superpave para cementos asfálticos miden propiedades físicas que pueden ser directamente relacionadas con el desempeño en campo a través de principios ingenieriles. Las pruebas Superpave para cemento asfáltico son también llevadas a temperaturas a las que se encuentran los pavimentos en servicio.

El tema central de las especificaciones Superpave es la confianza sobre las pruebas del cemento asfáltico en condiciones que simulan las tres etapas críticas durante la vida del asfalto. Las pruebas realizadas en el asfalto original, representan la primera etapa transportación, almacenamiento y manejo.

La segunda etapa representa el asfalto durante la producción, mezcla y construcción; es simulada por las especificaciones mediante el envejecimiento del asfalto en el horno rotatorio de película delgada. Este procedimiento expone una película delgada de asfalto a calor y aire para aproximar el envejecimiento que sufre el asfalto durante su mezcla y construcción.

La tercera etapa ocurre cuando envejece el cemento asfáltico desde que se coloca en la mezcla asfáltica, carpeta asfáltica, hasta el fin de su vida de diseño para la cual fue planeado. Esta etapa se simula en la vasija de envejecimiento a presión (PAV), mediante la exposición de muestras de asfalto a calor y presión para representar el envejecimiento del pavimento a lo largo de los años de servicio.

Tabla 16. Equipos y propósito de la prueba superpave

Equipo	Propósito
Horno rotatorio de película delgada (RTFO)	Simula las características del

Equipo	Propósito
Vasija del envejecimiento a presión (PAV)	envejecimiento del asfáltico
Reometro de corte directo (DSR)	Mide las propiedades del asfalto a temperaturas altas e intermedias
Viscosímetro rotacional (RV)	Mide las propiedades del asfalto a altas temperaturas
Reometro de viga en flexión (BBR) Ensayo de tensión directa (DTT)	Mide las propiedades del asfalto a bajas temperaturas

Las temperaturas de diseño del sistema de clasificación de asfaltos Superpave han sido elegidas en función de los tres mecanismos de falla por los que pasa el asfalto en servicio los cuales son: deformaciones permanentes, fatiga y fisuración térmica. Según estas pruebas se comprobó que las temperaturas más críticas en el rango de altas temperaturas son aquellas máximas temperaturas que se producen en el año durante 7 días corridos. En el caso de las bajas temperaturas se considera como crítica la menor temperatura alcanzada durante el año.

Las temperaturas mencionadas son las del aire y se computan para un promedio no menor de 20 años de datos acumulados en las estaciones meteorológicas. Mediante un algoritmo se traducen en temperaturas del pavimento a 20 mm de la superficie, con lo cual se esta en condiciones de determinar las propiedades de los asfaltos a dichas temperaturas y para el transito estimado.

Los grados asfálticos contenidos en la especificación Superpave indican las temperaturas superiores e inferiores que los mismos resisten adecuadamente afín de maximizar la resistencia a deformaciones permanentes, fisuras por fatiga y fisuramiento térmico. Ellos pueden sintetizarse en la siguiente tabla.

Tabla 17. Grado de ligante de Superpave

Grado asfáltico Alta temperatura	Grado asfáltico Baja temperatura
PG 46	34, 40, 46
PG 52	10, 16, 22, 28, 34, 40, 46
PG 58	16, 22, 28, 34, 40
PG 64	10, 16, 22, 28, 34, 40
PG 70	10, 16, 22, 28, 34, 40
PG 76	10, 16, 22, 28, 34
PG 82	10, 16, 22, 28, 34

Como puede verse, para cada temperatura alta existen varias temperaturas bajas que conforman a un grado asfáltico determinado. Así por ejemplo un PG 46 puede ser PG 46-34 ó PG 46-40 ó PG 46-46 que significa que resiste hasta los 7 días corridos una temperatura alta de 46 °C y una temperatura mínima de -34 °C, ó -40 °C, ó -46 °C.

❖ Emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas son parte de los asfaltos líquidos. Es un sistema heterogéneo de dos fases normalmente inmiscibles, como son el asfalto y el agua, al que se le incorpora una pequeña cantidad de un agente emulsificante de carácter aniónico o catiónico, el cual mantiene en dispersión el sistema, siendo la fase continua el agua y la discontinua los glóbulos del asfalto. Permite la aplicación del asfalto donde no es práctico, por las condiciones.

Cuando la emulsión se pone en contacto con el agregado se produce un desequilibrio que la rompe, llevando a las partículas del asfalto a unirse a las superficies del agregado. El agua fluye o se evapora, separándose de las partículas pétreas recubiertas por el asfalto. Existen emulsificantes que permiten que esta rotura sea instantánea y otros que retardan éste fenómeno. De acuerdo con la velocidad de rotura, las emulsiones asfálticas pueden ser:

- ✓ *De rompimiento rápido*: Las que se designa por las letras RS (Rapid Setting). Estas producen una capa relativamente dura y principalmente es usada para aplicaciones en spray sobre agregados y arenas de sello, así como penetración sobre piedra quebrada; que por ser de alta viscosidad sirve de impermeabilizante.
- ✓ *De rompimiento medio*: las que se designan con las letras MS (Medium Setting).
- ✓ *Rompimiento lento*: designada por las letras SS (Slow Setting). Son diseñadas para proporcionar una máxima estabilidad de mezclado. Son usadas para dar un buen acabado con agregados compactos y asegurar una buena mezcla con éstos.

El tipo de emulsión a utilizar depende de varios factores, tales como las condiciones climáticas durante la construcción, tipos de agregados disponibles, entre otros.

Las emulsiones asfálticas deben ser afines a la polaridad de los agregados con el propósito de tener una buena adherencia. Esta cualidad se la confiere el emulsificante, el cual puede darle polaridad negativa o positiva, tomando el nombre de aniónicas, las primeras, afines a los áridos de cargas positivas y catiónica, las segundas, afines a áridos de cargas negativas; como son las de origen cuarzoso o silíceo.

A continuación se presenta algunas pruebas que se efectúan a las emulsiones asfálticas para reconocer sus distintas propiedades.

- *Carga eléctrica de la partícula.* Se efectúa para identificar la polaridad de los glóbulos de asfalto en una emulsión teniendo carga eléctrica negativa las aniónicas y positiva las catiónicas.
- *Potencial de hidrógeno.* (PH). Consiste en conocer el grado de acidez o alcalinidad de la fase acuosa, además también indica el tipo de emulsión de que se trata sabiendo que las emulsiones *catiónicas* son ácidas y las *aniónicas* son alcalinas.
- *Demulsibilidad.* Esta prueba indica la rapidez relativa a la cual los glóbulos coloidales de asfalto en las emulsiones del tipo rápido quebraran cuando se esparza en delgadas capas sobre un suelo o agregado
- *Mezclabilidad con cemento Pórtland.* Este ensayo permite conocer la estabilidad de los productos al ser mezclado con un material fino.
- *Cubrimiento del agregado pétreo en húmedo.* Con este ensaye se estima que tanta afinidad existe entre la emulsión y el agregado pétreo, permite observar el comportamiento de esta unión ante la acción del agua.
- *Residuo de destilación.* Con esta prueba se obtiene el contenido de agua y disolventes que presenta la emulsión cuando se calienta. Al residuo se le efectúan pruebas de penetración, ductilidad y solubilidad para saber como le afecta la temperatura al cemento asfáltico.
- *Viscosidad saybolt-furol.* Esta prueba permite conocer la consistencia de la emulsión asfáltica a diferentes temperaturas, con el propósito de estudiar la susceptibilidad al calor de las emulsiones asfálticas y determinar la viscosidad adecuada para su utilización.
- *Asentamiento en 5 días.* Ayuda a conocer la homogeneidad que presentan los productos al ser almacenados.

❖ **Asfaltos modificados**

Es un asfalto al cual se le ha añadido de manera homogénea y estable, en un cierto porcentaje previamente analizado, algún tipo de aditivo, para mejorar sus propiedades reológicas (relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir). El asfalto es un material muy susceptible a los cambios de temperatura, sufre envejecimiento por intemperismo, es afectado por la oxidación y la fotodegradación. Sus propiedades mecánicas son muy pobres: es quebradizo a bajas temperaturas y fluye un poco arriba de la temperatura del medioambiente, además de tener una baja recuperación elástica, lo que limita ampliamente su rango de utilidad.

Por estas razones el material asfáltico en ocasiones tiene que ser modificado mediante la adición de un agente químico para mejorar sustancialmente su comportamiento para una amplia gama de condiciones de temperatura o de aplicación de las cargas

❖ Otros tipos

- **Roca asfáltica:** roca porosa como arenisca o caliza, que se ha impregnado con asfalto natural a lo largo de su vida geológica.
- **Producto asfáltico de imprimación:** asfalto líquido de baja viscosidad que penetra en una superficie no bituminosa cuando se aplica a ella.
- **Pintura asfáltica:** producto asfáltico líquido que a veces contiene pequeñas cantidades de otros materiales como negro de humo, polvo de aluminio y pigmentos minerales.

3.3.4. Usos de los productos bituminosos en la construcción de pavimentos

❖ Riego de Imprimación

Una capa de imprimación es una aplicación de asfalto de baja viscosidad a una base granular que se prepara para la colocación de una capa asfáltica. La capa de imprimación está diseñada para cumplir varias funciones:

- Cubrir y darle adherencia a las partículas sueltas de la superficie de la base.
- Endurecer la superficie.
- Impermeabilizar la superficie de la base.
- Sellar los vacíos capilares.
- Proveer adherencia entre la base y la capa siguiente.

En nuestro país, al igual que en el resto del mundo, el uso de las emulsiones asfálticas para esta tarea es relativamente nuevo. Ya que para la mayoría de los riegos de imprimación se efectuaron con diluidos de endurecimiento medio. La cantidad a ser usada depende de la naturaleza de la base granular y de las condiciones del tiempo, la granulometría del agregado, el tamaño de los vacíos, y la absorción del agregado ya que todos estos elementos la afectan. El INVIAS recomienda las siguientes especificaciones.

Tabla 18. Especificaciones de asfaltos líquidos para riegos de imprimación

Características	Unidades	Norma de ensayo INV	MC 30	
			Min.	Máx.
Punto de inflamación (copa abierta de Tag.)	°C	E-710	38	-
Viscosidad cinemática (60°C)	cSt	E-715	30	60
Viscosidad de Saybolt Furol (25°C)	s	E-714	75	150
Destilación: Destilado (% sobre volumen total destilado hasta 360 °C)				
A 225 °C	%	E-723	-	25
A 260 °C	%		40	70

Características	Unidades	Norma de ensayo INV	MC 30	
			Min.	Máx.
A 316 °C	%		75	93
Residuos de destilación a 360°C(% en volumen por diferencia)	%	E-723	50	60
Ensayo sobre el residuo de la destilación				
Penetración (25°C, 100 g, 5s)	0.1 mm	E-706	120	300
Ductilidad (25°C, 5 cm/min.)	cm.	E-702	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99.5	100

❖ Riego de Liga.

Este tipo de riego consiste en el suministro, transporte, calentamiento y aplicación uniforme de un producto asfáltico sobre un pavimento (rígido o sobre una capa bituminosa, previamente a la extensión de otra capa bituminosa). Se utiliza para obtener una buena adherencia con la nueva capa asfáltica a construir. Las recomendaciones que hace el INVIAE para este tipo de riego son: El ligante que se puede usar par este proceso, será una emulsión asfáltica catiónica convencional o modificada con polímeros, de rotura rápida, como: Emulsión asfáltica (CRR-1 o CRR-2) o Emulsión asfáltica modificada con polímeros (CRR-1m o CRR-2m) de acuerdo con las condiciones establecidas en las tablas 20 y 24.

❖ Riego antipolvo

Es la aplicación de ligante sobre caminos de tierra para fijar el material suelto de su superficie y proteger la superficie del afirmado. El objetivo final es obtener una película delgada de asfalto a partir de riegos sucesivos efectuados con emulsión muy diluida.

❖ Estabilizaciones

Las estabilizaciones con emulsión asfáltica son una mezcla de emulsión asfáltica, componentes minerales constituidos por suelo fino, arena o grava natural de granulometría similar a la de la subbase, agua y a veces aditivos, conformando un producto que se utiliza en capas de base para carreteras.

❖ **Riego de curado**

Se define como riego de curado la aplicación de una película impermeable de ligante hidrocarbonado sobre una capa tratada con un conglomerante hidráulico como por ejemplo una mezcla de tipo grava-cemento o suelo-cemento de los que se usan como capa base en carreteras. Alguno de los objetivos de la aplicación de este riego son: brindar impermeabilidad a la superficie y retardar o impedir la evaporación del agua de la mezcla en las primeras horas, facilitando el fraguado de la misma, teniendo unas condiciones adecuadas de humedad y contribuyendo así para que no se presenten fisuras en la estructura. Para el riego de curado el INVIAS hace las siguientes sugerencias: El ligante bituminoso que se puede emplear, será una emulsión asfáltica catiónica de rotura rápida tipo CRR-1 (que cumpla con las condiciones indicadas en la tabla 20)

❖ **Riego de sellado**

El riego de sellado consiste en la aplicación de material bituminoso sobre una superficie de rodadura, seguida de la extensión y compactación de una capa de arena, agregado finó o polvo de trituración. Este riego sirve para sellar o impermeabilizar las capas de rodadura, protegiendo las capas inferiores de los efectos nocivos que puedan causar las aguas lluvias, y además ayudar a impedir la salida de agregados a la superficie por la acción del tránsito.

3.4. MEZCLAS BITUMINOSAS

3.4.1. Mezcla abierta en frío

Este tipo de mezcla se produce al combinar un agregado por lo general de tamaño grueso y de granulometría uniforme y una emulsión de rompimiento medio, pero ambos elementos en frío. La mezcla en frío se puede utilizar para reperfilados, capas base, capas de rodadura y para los bacheos.

El Instituto Nacional de Vías recomienda la siguiente granulometría para la mezcla abierta en frío y también que el material bituminoso para elaborar la mezcla sea una emulsión asfáltica catiónica de rotura media, correspondiente al tipo CRM la cual se muestra a continuación en la tabla 20.

Tabla 19. Granulometría de la mezcla en frío

Tamiz		Porcentaje que pasa		
Normal	Alaterno	MAF-1	MAF-2	MAF-3
37.5 mm	1 1/2"	100	-	-
25.0 mm	1"	70-95	100	-
19.0 mm	3/4"	-	70-95	100
12.5 mm	1/2"	25-55	-	70-95
9.5 mm	3/8"	-	20-45	-
4.75 mm	No.4	0-15	0-20	10-30
2.36 mm	No.8	0-5	0-10	0-10
75 µm	No.200	0-2	0-2	0-2

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 441-07 año 2007.

Tabla 20. Especificaciones para emulsiones catiónicas

TIPOS DE EMULSIONES		ROTURA RÁPIDA				ROTURA MEDIA		ROTURA LENTA					
		CRR - 1		CRR - 2		CRM		CRL - 0		CRL - 1		CRL - 1h	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
1. ENSAYO SOBRE EMULSIÓN													
<i>Viscosidad</i>													
<ul style="list-style-type: none"> Saybolt Furol a 25 C Seg Saybolt Furol a 50 C Seg 	E-763	-	-	-	-	-	-	-	50	-	200	-	100
		20	100	20	300	20	450	-	-	-	-	-	-
Contenido de agua en volumen %	E-761	-	40	-	35	-	35	-	50	-	43	-	43
<i>Estabilidad Almacenamiento</i>													
<ul style="list-style-type: none"> Sedimentación a los 7 días % 	E-764	-	5	-	5	-	5	-	10	-	5	-	5
<i>Destilación</i>													
<ul style="list-style-type: none"> Contenido de Asfalto Residual % Contenido de disolventes % 	E-762	60	-	65	-	60	-	40	-	57	-	57	-
		-	3	-	3	-	12	10	20	-	-	-	-
Tamizado													
<ul style="list-style-type: none"> Retenido T 20 (850 µm) 	E-765	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1
<i>Rotura</i>													
<ul style="list-style-type: none"> Dioctilsulfouccinato sódico % Mezcla con cemento % 	E-766	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	E-770	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
<i>Carga Partícula</i>	E-767	POSITIVA	POSITIVA			POSITIVA		POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA	POSITIVA
<i>PH</i>	E-768	-	6	-	6	-	6	-	6	-	6	-	6
<i>Recubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento</i>													
<ul style="list-style-type: none"> Con agregado seco Con agregado seco y acción del agua Con agregado húmedo Con agregado húmedo y acción del agua 	E-769	-	-	-	-	Buena		-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	Satisfactoria		-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	Satisfactoria		-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	Satisfactoria		-	-	-	-	-	-
2. ENSAYOS SOBRE RESIDUO DE DESTILACIÓN													
Penetración(25 °C, 100 gr, 5 seg.)	E-706	60	100	60	100	100	250	200	300	60	100	60	100
0.1 mm.		100	250	100	250					100	250		
Ductilidad (25 °C, 5 cm /m)	E-702	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
cm.													
Solubilidad en tricloroetileno %	E-713	97	-	97	-	97	-	97	-	97	-	97	-

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 400-07.

3.4.2. Mezcla densa en frío

En Colombia el Instituto Nacional de Vías recomienda producir mezcla por la combinación de un ligante bituminoso que puede ser una emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta, de los tipos CRL-1 o CRL-1h (que cumpla los requisitos de calidad establecidos en la tabla 20), con agregados minerales bien gradados granulométricamente, con un porcentajes alto de finos. Este tipo de mezcla se puede fabricar, extender y compactar a temperatura ambiente.

Tabla 21. Granulometría para diferentes tipos de mezclas densas en frío

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA		
Normal	Alternativo	MDF-1	MDF-2	MDF-3
37.5 mm	1 1/2"	100	-	-
25.0 mm	1"	80-95	100	-
19.0 mm	3/4"	-	80-95	100
12.5 mm	1/2"	62-67	-	80-95
9.5 mm	3/8"	-	60-75	-
4.75 mm	No. 4	45-60	47-62	50-65
2.36 mm	No. 8	35-50	35-50	35-50
300 µm	No. 50	13-23	13-23	13-23
75 µm	No. 200	3	3-8	3-8

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 440-07.

Tabla 22. Tipos de mezcla por utilizar en función del tipo y espesor compacto de la capa

Tipo de capa	Espesor compactado (mm)	Tipo de mezcla
Rodadura	50-75	MDF-2
	40-50	MDF-3
Intermedia	≥ 50	MDF-2
Base	≥ 75	MDF-1
Bacheo	50-75	MDF-2
	≥ 75	MDF-1

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 440-07.

3.4.3. Lechada asfáltica

Según el INVIAS la lechada asfáltica puede hacerse con una combinación de de emulsión catiónica, convencional de rotura lenta CRL1-h (teniendo en cuenta las especificación de la tabla 18) o una emulsión modificada con polímeros, catiónica de rotura lenta y superestable del tipo CRL1-hm (teniendo en cuenta lo establecido en la tabla 22); con agregados finos bien gradado, llenante mineral y agua. Los principales campos donde se suelen usar las lechadas son en tratamientos de sellados y en tratamientos antideslizantes.

El Instituto Nacional de Vías, para Colombia hace la siguiente recomendación para la granulometría de las lechadas asfálticas.

Tabla 23. Granulometría de las lechadas asfálticas

Tamiz		Porcentaje que pasa			
Normal	Alternativo	LA-1	LA-2	LA-3	LA-4
12.5 mm	1/2"	100	-	-	-
9.5 mm	3/8"	85-100	100	100	-
4.75 mm	No.4	60-85	70-90	85-100	100
2.36 mm	No.8	40-60	45-70	65-90	95-100
1.18 mm	No.16	28-45	28-50	45-70	65-90
600 µm	No.30	19-34	19-34	30-50	40-60
300 µm	No.50	12-25	12-25	18-30	24-42
180 µm	No.80	7-18	7-18	10-20	15-30
75 µm	No.200	4-8	5-11	5-15	10-20

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 433-07 año 2007.

Tabla 24. Especificaciones para emulsiones asfálticas modificadas con polímeros

TIPOS DE EMULSIONES		Norma de Ensayo INV	ROTURA RÁPIDA				ROTURA MEDIA		ROTURA LENTA		
			CRR-1m		CRR-2m		CRM-m		CRL-1hm		
ENSAYOS SOBRE EMULSIÓN			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Viscosidad Saybolt Furol	a 25°C a 50°C	s s	E-763	- 20	- 100	- 20	- 300	- 20	- 450	- -	100 100
Contenido de agua en volumen		%	E-761	-	40	-	35	-	35	-	43
Estabilidad almacenamiento Sedimentación a los 7 días		%	E-764	-	5	-	5	-	5	-	5
Destilación		%	E-762	60	-	65	-	60	-	57	-
Contenido de asfalto residual		%		-	3	-	3	-	12	-	0
Contenido de disolventes		%	E-765	-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1
Tamizado		%		-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1
Retenido en tamiz nº 20 (850 µm)		%		-	0.1	-	0.1	-	0.1	-	0.1

TIPOS DE EMULSIONES		Norma de Ensayo INV	ROTURA RÁPIDA				ROTURA MEDIA		ROTURA LENTA	
			CRR-1m		CRR-2m		CRM-m		CRL-1hm	
Rotura Diocilsulfosuccinato sódico Mezcla con cemento	%	E-766	40	-	40	-	-	-	-	-
	%	E-770	-	-	-	-	-	-	-	2
Carga partícula		E-767	Positiva		Positiva		Positiva		Positiva	
pH		E-768	-	6	-	6	-	6	-	6
Recubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento Con agregado seco Con agregado seco y acción del agua Con agregado húmedo Con agregado húmedo y acción del agua		E-769	-	-	Buena		-	-	-	-
			-	-	Satisfactoria		-	-	-	-
			-	-	Satisfactoria		-	-	-	-
			-	-	Satisfactoria		-	-	-	-
ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE EVAPORACIÓN		E-771								
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706	60 100	100 250	60 100	100 250	100	250	60	100
Punto de ablandamiento	°C	E-712	55 45	- -	55 45	- -	40	-	55 45	- -
Ductilidad (5°C, 5 cm./min)	cm.	E-702	10	-	10	-	10	-	10	-
Recuperación elástica por torsión 25°C	%	E-727	12	-	12	-	12	-	12	-

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 400-07.

Tabla 25. Composición de las lechadas asfálticas.

Características	LA-1	LA-2	LA-3	LA-4
Ligante residual (% en peso sobre agregados).	5.5-7.5	6.5-12.0	7.0-13.0	10.0-15.0
Agua preenvuelta (% en peso sobre agregados).	8-12	10-15	10-15	10-20
Agua total (% en peso sobre agregados)	10-20	10-20	10-20	10-30
Cantidad de lechada (kg./m ²)	15-20	10-15	7-12	4-8
Capa en que se aplica	2 ^a o única		cualquiera	1 ^a o única

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 433-07

Tabla 26. Criterios para el diseño de lechadas asfálticas

Ensayo	Norma de ensayo INV	Valor admisible máximo
Perdida en el ensayo de abrasión en pista húmeda	E-778	0.065 g/cm ²
Absorción de arena en la maquina de rueda cargada Trnsito medio diario (vehículo) - Menores de 300 - De 300 a 1500 - Mas de 1500	E-779	0.08 g/cm ² 0.07 g/cm ² 0.06 g/cm ²

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 433-07

3.4.4. Mezcla densa en caliente

Las mezclas densas en caliente están conformadas por agregados uniformemente mezclados y recubiertos por cemento asfáltico. Para poder lograr obtener una mezcla con una buena manejabilidad y fluidez, se deben someter tanto el agregado como el cemento asfáltico a un previo calentamiento antes de ser añadidos a la mezcla, por esta razón esta combinación es denominada “mezcla asfáltica en caliente”. La mezcla asfáltica puede ser producida para un amplio número de combinaciones de agregados, cada una con sus características particulares adecuadas al diseño específico y los requerimientos específicos de cada una de las construcciones.

Gradación de la mezcla de agregados: En Colombia el instituto Nacional de Vías recomienda que el conjunto de agregado grueso, agregado fino y llenante mineral se ajuste a alguna de las siguientes gradaciones y además proporciona algunos de los usos que se le pueden dar a los distintos tipos de mezcla densa en caliente:

Tabla 27. Gradación de la mezcla de agregados

Tamiz		Porcentaje que pasa		
Normal	Alternativo	MDC-1	MDC-2	MDC-3
25.0 mm	1"	100	-	-
19.0 mm	3/4"	80-95	100	-
12.5 mm	1/2"	67-85	80-95	-
9.5 mm	3/8"	60-77	70-88	100
4.75 mm	No.4	43-59	49-65	65-87
2.00 mm	No.10	29-45	29-45	43-61
425 μm	No.40	14-25	14-25	16-29
180 μm	No.80	8-17	8-17	9-19
75 μm	No.200	4-8	4-8	5-10

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 450-07

Para el cemento asfáltico empleado en la mezcla se debe tener en cuenta el grado de penetración del mismo, el cual depende de las características climáticas de la región donde se vaya a colocar la mezcla y del número esperado de ejes equivalentes de 80 KN en el carril y periodo de diseño. El Instituto Nacional de Vías hace las siguientes recomendaciones:

Tabla 28. Tipo de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente

Tipo de capa	NT1			NT2			NT3		
	Temperatura media anual ponderada de la región (°C)								
	>24	15-24	<15	>24	15-24	<15	>24	15-24	<15
Rodadura intermedia	60-70	60-70 u 80-100	80-100	60-70 u 80-100	60-70 u 80-100		60-70 o tipo III	60-70 o tipo II	80-100 o tipo II
Base	-	-	-	60-70 u 80-100	60-70 u 80-100	80-100	60-70	60-70 u 80-100	80-100
Mezcla discontinua en caliente para capa de rodadura	-	-	-	Tipo II o tipo III	Tipo II o tipo III	Tipo II o tipo III	Tipo II o tipo III	Tipo II o tipo III	Tipo II o tipo III
Mezcla drenante	-	-	-	Tipo I o tipo II	Tipo I o tipo II	Tipo I o tipo II	Tipo I o tipo II	Tipo I o tipo II	Tipo I o tipo II
Alto módulo	-	-	-	-	-	-	Tipo V	Tipo V	Tipo V

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 400-07.

Características	Unidades	Norma de ensayo INV.	60-70		80-100	
			Min.	Máx.	Min.	Máx.
Penetración (25°C, 100g, 5s.)	0.1 mm	E-706	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724	-1	+1	-1	+1
Viscosidad absoluta (60°C)	P	E-716 o E-717	1500		1000	
Ductilidad (25°C, 5 cm./min.)	cm.	E-702	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99	-	99	-
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	E-709	230	-	230	-
Perdida de masa por calentamiento en película delgada (163°C, 75 minutos)	%	E-720	-	1.0	-	1.0
Penetración del residuo luego de la perdida por calentamiento (E-720), en % de la penetración original	%	E-706	52	-	48	-

Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (E-720).	°C	E-712	-	5	-	5
--	----	-------	---	---	---	---

Las designaciones Tipo I, Tipo II, Tipo III y Tipo V corresponden a cementos asfálticos modificados con polímeros. En la tabla la tabla 18 se presentan algunas especificaciones de estos tipos de cementos.

Tabla 29. Especificaciones del cemento asfáltico

Características	Unidades	Norma de ensayo INV.	60-70		80-100	
			Min.	Máx.	Min.	Máx.
Penetración (25°C, 100g, 5s.)	0.1 mm	E-706	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724	-1	+1	-1	+1
Viscosidad absoluta (60°C)	P	E-716 o E-717	1500		1000	
Ductilidad (25°C, 5 cm./min.)	cm.	E-702	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99	-	99	-
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	E-709	230	-	230	-
Perdida de masa por calentamiento en película delgada (163°C, 75 minutos)	%	E-720	-	1.0	-	1.0
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento (E-720), en % de la penetración original	%	E-706	52	-	48	-
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (E-720).	°C	E-712	-	5	-	5

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 400-07.

Las mezclas densas en caliente se puede diseñar, siguiendo el método Marshall (INV E-748) y aplicando los siguientes criterios:

Tabla 30. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall

Características		Nora de ensayo INV	Mezclas densas, semidensas y Gruesas		
			Categoría d tránsito		
			NT1	NT2	NT3
Compactación golpes/cara		E-748	50	75	75
Estabilidad mínima Kg.		E-748	500	750	900
Flujo (mm.)		E-748	2 - 4	2- 4	2-3.5
Vacíos con aire (Va), %	Capa de rodadura	E-736 o E-799	3 - 5	3 - 5	4 - 6
	Intermedia		4-8	4-8	4-7
	Base		-	5 - 9	5 - 8
Vacíos en los agregados minerales (VAM), %	Gradación MDC-1 %	E-799	≥ 14	≥ 14	≥ 14
	Gradación MDC-2 %		≥ 15	≥ 15	≥ 15
	Gradación MDC-3 %		≥ 16	≥ 16	≥ 16
% de vacíos llenos de asfalto (VFA) “ (Volumen de asfalto efectivo / Vacíos en los agregados minerales) x 100 “ Capas de rodadura e intermedia		E-799	65-75	65-78	65-80
Relación Llenante/ Asfalto efectivo, en peso		E-799	0.8 – 1.2		

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Artículo 450-07.

Tabla 31. Especificaciones de cementos asfálticos modificados con polímeros

Características	unidad	Norma de ensayo INV	Tipo I		Tipo II		Tipo III		Tipo IV		Tipo V	
			Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Asfalto original												
Penetración (25°C, 100g, 5s.)	0.1mm.	E-706	55	70	55	70	55	70	80	130	15	40
Punto de ablandamiento con aparato de añillo y bola	°C	E-712	58	-	58	-	65	-	60	-	65	-
Ductilidad (5°C, 5cm./min)	cm.	E-702	-	-	15	-	15	-	30	-	-	-
Recuperación elástica por torsión a 25°C.	%	E-727	15	-	40	-	70	-	70	-	15	-
Estabilidad al almacenamiento Diferencia en el punto de ablandamiento	°C	E-726 Y E-712	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de ignición mediante la copa abierta de Cleveland	°C	E-709	230	-	230	-	230	-	230	-	230	-
Residuo del ensayo de pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (INV E-720)												
Pérdida de masa	%	E-720		1	-	1	-	1	-	-	70	-
Penetración de residuo luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento, % de la penetración original	%	E-706	65	-	65	-	65	-	60	-	-	-
Ductilidad (5°C, 5 cm/min)	cm.	E-702	-	-	8	-	8	-	15			

Fuente Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 400-07

Tabla 32. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas (Nivel de tránsito NT1)

Tipos de tratamiento o mezcla	Desgaste los Ángeles	DESGASTE MICRO-DEVAL	10% DE FINOS (KN)		Perdidas en ensayo de solidez		Partículas fract. Mecanic. (agregado grueso % mínimo)	Angularidad Método A (Agregado fino)	Coeficien. de pulimiento acelerado	Partículas planas y alargadas (relación 5:1)
			SECO	Relación Humedad/sec o	Sulfato de sodio	Sulfato de magnesio				
NORMA INV	E-218 E-219	E-238	E-224	E-224	E-220	E-220	E-227	E-239	E-232	E-240
lechada asfáltica	25% máx. (Rodadura) 35% máx. Intermedia	20% máx. (Rodadura) 25% máx. (Intermedia)	110 min. (Rodadura) 90 min. (intermedia)	75% min. (Rodadura) 75 min. (intermedia)	12 % máx.	18 % máx.	85/75 (rodadura) 75/- (intermedia)	45 % min.	0,45 min. (rodadura)	10 % máx.
Mezcla abierta en frío	25% máx. (Rodadura) 35% máx. Intermedia	20% máx. (Rodadura) 25% máx. (Intermedia)			12 % máx.	18 % máx.				
Mezcla densa en frío - agregado grueso - agregado fino - gradación combinada	25% máx. (Rodadura) 35% máx. (Intermedia) 35 % (base)	20% máx. (Rodadura) 25% máx. (Intermedia)	110 min. (Rodadura) 90 min. (intermedia) 75 mini (base)	75% min. (Rodadura) 75 min. (Intermedia) 75% min. (base)	12 % máx. 12 % máx.	18 % máx. 18 % máx.	85/75 (rodadura) 75/- (intermedia) 60/- (base)	45 %min. (rodadura) 40 % min. (Intermedias) 35% min. (base)	0,45 min. (rodadura)	10 % máx.
Mezcla abiete en caliente	35% máx.	25 % máx.	90 min.	75% min.	12 % máx.		75/-			10 % máx.
mezcla densa, semidensa y gruesa en caliente -agregado grueso -agregado fino -gradación combinada	25% máx. (Rodadura) 35% máx. (intermedia) 35 % (base)	20% máx. (Rodadura) 25% máx. (Intermedia) 25 % (base)	110 min. (Rodadura) 90 min. (intermedia)	75% min. (Rodadura) 75 min. (Intermedia) 75% min. (base)	12 % máx. 12 % máx.	18 % máx. 18 % máx.	85/75 (rodadura) 75/- (intermedia) 60/- (base)	45 %min. (rodadura) 40 % min. (Intermedias) 35% min. (base)	0,45 min. (rodadura)	10 % máx.
mezcla discontinua en caliente	25 % máx.	20 % máx.	110 min.	75 % min.	12 % máx.	18 % máx.	85/70	45 % min.	0,45 min.	10 % máx.
Mezcla drenante	25 % máx.	20 % máx.	110 min.	75 % min.	12 % máx.	18 % máx.	85/70		0,45 min.	10 % máx.
Reciclado de pavimento existente (Material de adición)	40% máx. (En frío) 25% máx. (en caliente)	25 % máx. (En frío) 20 % máx. (en caliente)	75 % min. (En frío) 110% min. (en caliente)	75 % min. (En frío) 75% min. (en caliente)	12 % máx.	18 % máx.	50/- (en frío) 85/70 (en caliente)	35 % min. (En frío) 45 % min. (en caliente)	0,45 min. (en caliente)	10 % máx.

Continuación de la tabla 32. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas (Nivel de tránsito NT1)

Tipos de tratamiento o mezcla	IP	Equivalente de arena	Contenido de impurezas (Agregado grueso)	ADHESIVIDAD					
				Riedel Webber	Stripping	Bandeja	Resistencia conservada Inm-comp.	resistencia conservada Tracción indirecta	Perdida Cántabro tras inmersión
NORMA INV	E- 125 E-126	E-133	E-237	E-774	E-737	E-740	E-738	E-725	
lechada asfáltica	N.P.	50 % mín.		4 mín.					
Mezcla abierta en frío			0.5 % máx.		95 % mín.				
Mezcla densa en frío - agregado grueso - agregado fino - gradación combinada	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.				75% min.		
Mezcla abiete en caliente			0.5 % máx.		95 % mín.				
mezcla densa, semidensa y gruesa en caliente -agregado grueso -agregado fino -gradación combinada	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.					80 % mín.	
mezcla discontinua en caliente	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.					80 % mín., (tipo F)	25 % máx. (tipo M)
Mezcla drenante	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.						40 % máx.,
Reciclado de pavimento existente (Material de adición)	N.P.	30 mín. (en frío) 50 % mín. (en caliente)	0.5 % máx. (en caliente)				50% min. (En frío)	80 % mín. (en caliente)	

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 400-07

Tabla 33. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas (Nivel de tránsito NT2)

Tipos de tratamiento o mezcla	Desgaste los Ángeles	Desgaste micro-deval	10% de finos (KN)		Perdidas en ensayo de solidez		Partículas fract. Mecanic. (agregado grueso % mínimo)	Angularidad Método A (Agregado fino)	Coeficiente de pulimiento acelerado	Forma		
			Seco	Relación Humedad/seco	Sulfato de sodio	Sulfato de magnesio				Índice de aplanamiento	Índice de alargamiento	Partículas planas y alargadas (relación 5:1)
NORMA NIC	E-218 E-219	E-238	E-224	E-224	E-220	E-220	E-227	E-239	E-232	E-230	E-230	E-230
sello de arena asfalto					12 % máx.	18 % máx.		45 % min.				
tratamiento superficial simple y doble	25% máx.	25 % máx.			12 % máx.	18 % máx.	75/60		0,45 min.	30 % máx.	30 % máx.	
lechada asfáltica	25% máx.	25 % máx.			12 % máx.	18 % máx.		45 % min.				
Mezcla abierta en frío	25% máx. (Rodadura) 35% máx. Intermedia	25% máx. (Rodadura) 35% máx. Intermedia			12 % máx.	18 % máx.	75/60 (rodadura) 75/- (intermedia)		0,45 min. (rodadura)			10 % máx.
Mezcla densa en frío	25% máx. (Rodadura) 35% máx. (Intermedia) 35 % (base)	25% máx. (Rodadura) 30% máx. (Intermedia) 30 % (base)			12 % máx.	18 % máx.	75/60 (rodadura) 75/- (intermedia) 60/- (base)	45 %min. (rodadura) 40 % min. (Intermedias) 35% min. (base)	0,45 min. (rodadura)			10 % máx.
-agregado grueso					12 % máx.	18 % máx.						
-agregado fino					12 % máx.	18 % máx.						
-gradación combinada					12 % máx.	18 % máx.						
Mezcla abierta en caliente	35% máx.	30% máx.			12 % máx.		75/60					10 % máx.
mezcla densa, semidensa y gruesa en caliente	25% máx. (Rodadura) 35% máx. (intermedia) 35 % (base)	25% máx. (Rodadura) 30% máx. (Intermedia) 30 % (base)			12 % máx.	18 % máx.	75/60 (rodadura) 75/- (intermedia) 60/- (base)	45 %min. (rodadura) 40 % min. (Intermedias) 35% min. (base)	0,45 min. (rodadura)			10 % máx.
-agregado grueso					12 % máx.	18 % máx.						
-agregado fino					12 % máx.	18 % máx.						
-gradación combinada					12 % máx.	18 % máx.						
mezcla discontinua en caliente	25 % máx.	20 % máx.	110 min.	75 % min.	12 % máx.	18 % máx.	85/70	45 % min.	0,45 min.			10 % máx.
Mezcla drenante	25 % máx.	20 % máx.	110 min.	75 % min.	12 % máx.	18 % máx.	85/70		0,45 min.			10 % máx.
reciclado de pavimento existente (Material de adición)	40% máx. (En frío) 25% máx. (en caliente)	30% máx. (En frío) 25% máx. (en caliente)			12 % máx.	18 % máx.	50/- min. (En frío) 75/60 min. (en caliente)	35 % min. (En frío) 45 % min. (en caliente)	0,45 min. (en caliente)			10 % máx.

Continuación de la tabla 33. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas (Nivel de tránsito NT2)

Tipos de tratamiento o mezcla	IP	Equivalente de arena	Contenido de impurezas (Agregado grueso)	ADHESIVIDAD					
				Riedel Webber	Stripping	Bandeja	Resistencia conservada Inm-comp.	resistencia conservada Tracción indirecta	Perdida Cántabro tras inmersión
NORMA NIC	E- 125 E-126	E-133	E-237	E-774	E-737	E-740	E-738	E-725	E-760
Sello de arena asfalto	N.P.	50 % mín.		4 mín.					
tratamiento superficial simple y doble			0.5 % máx.			80% mín.			
lechada asfáltica	N.P.	50 % mín.		4 mín.					
Mezcla abierta en frío									
Mezcla densa en frío -agregado grueso -agregado fino -gradación combinada	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.		95 % mín.		75% mín.		
Mezcla abierta en caliente			0.5 % máx.		95 % mín.				
mezcla densa, semidensa y gruesa en caliente -agregado grueso -agregado fino -gradación combinada	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.					80 % mín.	
mezcla discontinua en caliente	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.					80 % mín., (tipo F)	25 % máx. (tipo M)
Mezcla drenante	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.						40 % máx.,
reciclado de pavimento existente (Material de adición)	N.P.	30 mín. (en frío) 50% mín. (en caliente)	0.5 % máx. (en caliente)				50% mín. (En frío)	80 % mín. (en caliente)	

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 400-07

Tabla 34. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas (Nivel de tránsito NT3)

Tipos de tratamiento o mezcla	Desgaste los Angeles	Desgaste MICRO-DEVAL	10% de finos (KN)		Perdidas en ensayo de solidez		Partículas fract. Mecanic. (agregado grueso % mínimo)	ANGULARIDAD Método A (Agregado fino)	Coeficiente de pulimiento o acelerado	Partículas planas y alargadas (relación 5:1)	IP	Equivalente de arena	CONTENIDO DE IMPUREZAS (Agregado grueso)
			SECO	Relación Humedad/seco	Sulfato de sodio	Sulfato de magnesio							
NORMA NIC	E-218 E-219	E-238	E-224	E-224	E-220	E-220	E-227	E-239	E-232	E-240	E-125 E-126	E-133	E-237
lechada asfáltica	25% máx. (Rodadura) 35% máx. Intermedia	20% máx. (Rodadura) 25% máx. (Intermedia)			12 % máx.	18 % máx.		45 % min.			N.P.	50 % min.	
Mezcla abierta en frío	25% máx. (Rodadura) 35% máx. Intermedia	20% máx. (Rodadura) 25% máx. (Intermedia)	110 min. (Rodadura) 90 min. (intermedia)	75% min. (Rodadura) 75 min. (intermedia)	12 % máx.	18 % máx.	85/75 (rodadura) 75/- (intermedia)		0,45 min. (rodadura)	10 % máx.			0.5 % máx.
Mezcla densa en frío -agregado grueso -agregado fino -gradación combinada	25% máx. (Rodadura) 35% máx. (Intermedia) 35 % (base)	20% máx. (Rodadura) 25% máx. (Intermedia)	110 min. (Rodadura) 90 min. (intermedia) 75 min. (base)	75% min. (Rodadura) 75 min. (Intermedia) 75% min. (base)	12 % máx. 12 % máx.	18 % máx. 18 % máx.	85/75 (rodadura) 75/- (intermedia) 60/- (base)	45 %min. (rodadura) 40 % min. (Intermedias) 35% min. (base)	0,45 min. (rodadura)	10 % máx.	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.
Mezcla abiete en caliente	35% máx.	25 % máx.	90 min.	75% min.	12 % máx.		75/-			10 % máx.			0.5 % máx.
mezcla densa, semidensa y gruesa en caliente -agregado grueso -agregado fino -gradación combinada	25% máx. (Rodadura) 35% máx. (intermedia) 35 % (base)	20% máx. (Rodadura) 25% máx. (Intermedia) 25 % (base)	110 min. (Rodadura) 90 min. (intermedia)	75% min. (Rodadura) 75 min. (Intermedia) 75% min. (base)	12 % máx. 12 % máx.	18 % máx. 18 % máx.	85/75 (rodadura) 75/- (intermedia) 60/- (base)	45 %min. (rodadura) 40 % min. (Intermedias) 35% min. (base)	0,45 min. (rodadura)	10 % máx.	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.
mezcla discontinua en caliente	25 % máx.	20 % máx.	110 min.	75 % min.	12 % máx.	18 % máx.	85/70	45 % min.	0,45 min.	10 % máx.	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.
Mezcla drenante	25 % máx.	20 % máx.	110 min.	75 % min.	12 % máx.	18 % máx.	85/70		0,45 min.	10 % máx.	N.P.	50 % mín.	0.5 % máx.
reciclado de pavimento existente (Material de adición)	40% máx. (En frío) 25% máx. (en caliente)	25 % máx. (En frío) 20 % máx. (en caliente)	75 % min. (En frío) 110% min. (en caliente)	75 % min. (En frío) 75% min. (en caliente)	12 % máx.	18 % máx.	50/- (en frío) 85/70 (en caliente)	35 % min. (En frío) 45 % min. (en caliente)	0,45 min. (en caliente)	10 % máx.	N.P.	30 min. (en frío) 50 % mín. (en caliente)	0.5 % máx. (en caliente)

**Continuación de la tabla 34. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos, lechadas y mezclas bituminosas
(Nivel de tránsito NT3)**

Tipos de tratamiento o mezcla	ADHESIVIDAD					
	Riedel Webber	Stripping	Bandeja	Resistencia conservada Inm-comp.	resistencia conservada Tracción indirecta	Perdida Cántabro tras inmersión
NORMA NIC	E-774	E-737	E-740	E-738	E-725	E-760
lechada asfáltica	4 mín.					
Mezcla abierta en frío		95 % mín.				
Mezcla densa en frío						
-agregado grueso						
-agregado fino						
-gradación combinada				75% mín.		
Mezcla abiete en caliente		95 % mín.				
mezcla densa, semidensa y gruesa en caliente						
-agregado grueso						
-agregado fino						
-gradación combinada					80 % mín.	
mezcla discontinua en caliente					80 % mín., (tipo F)	25 % máx. (tipo M)
Mezcla drenante						40 % máx.,
Reciclado de pavimento existente (Material de adición)				50% mín. (En frío)	80 % mín.(en caliente)	

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 400-07

3.5. CONCRETO HIDRÁULICO

El concreto hidráulico esta conformado por una mezcla homogénea de cemento, agregados finos y gruesos, agua y aditivos en el caso de ser necesarios. Los cuales deben cumplir ciertas características específicas para que el pavimento presente un desempeño adecuado.

3.5.1. Materiales que componen el concreto hidráulico

❖ Cemento

Según la norma INVIAS se debe usar cemento Portland tipo I, de marca aprobada oficialmente. Además es importante tener en cuenta que si el cemento presenta propiedades inadecuadas como fraguado parcial o contiene terrones endurecidos del producto, no se podrá emplear. Y tampoco se podrá usar material de bolsas abiertas que se halla empleado en proyectos anteriores. Las especificaciones del cemento Portland tipo I, se presenta en el capítulo 2, en las tablas 8 y 9.

❖ Agregado fino

Según la norma INVIAS el agregado fino es la fracción que pasa el tamiz de 4.75 mm (No.4). Este tipo de material proviene de arenas naturales o de la trituración de rocas, gravas, escorias siderurgicas u otro producto que sea adecuado, para las condiciones del proyecto. Pero el porcentaje de arena de triturada no puede constituir mas del 30% de la masa del agregado fino y además, la gradación escogida para el diseño de la mezcla no debe presentar mas de 45% de material retenido entre dos tamices consecutivos y su módulo de finura debe estar entre

2.3 y 3.1. Cuando el módulo de finura varíe en más de dos décimas (0.2) respecto del obtenido con la gradación escogida para definir la fórmula de trabajo, se deberá ajustar el diseño de la mezcla. Además de lo especificado anteriormente, el material fino debe cumplir las siguientes especificaciones:

Tabla 35. Granulometría para el agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico

Tamiz (mm.)		Porcentaje que pasa
Normal	Alternativo	BG-1
9.5 mm.	3/8"	100
4.75 mm.	Nº 4	95 - 100
2.36 mm.	Nº 10	85 - 100
1.18 mm	Nº 16	50 - 85
600 µm	Nº 30	25 - 60
300 µm	Nº 50	10 - 30
150 µm	Nº 100	2 - 10

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 500-07

Tabla 36. Requisitos de agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico

Ensayo		Norma de ensayo INV	Requisito
Durabilidad			
Perdidas en ensayo de solidez	-Sulfato de sodio	E-220	10

Ensayo		Norma de ensayo INV	Requisito
en sulfatos ,% máximo	-Sulfato de magnesio	E-220	15
Limpieza			
Índice de plasticidad, % máximo.		E – 126	No plástico
Equivalente de arena,% mínimo		E – 133	60
Terrones de arcilla y partícula deleznales, % máximo.		E – 211	3
Partículas livianas, % máximo		E – 221	0,5
Material que pasa el tamiz de 75 m		E – 214	3
Contenido de materia orgánica			
Color mas oscuro permisible		E – 212	igual a muestra patron
Características químicas			
contenido de sulfatos, expresados como		E – 233	1,2
Absorción			
Absorción de agua, % máximo.		E – 222	4

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 500-07

❖ Agregado grueso

Según la norma INVIAS, este material es el que es retenido en el tamiz de 4.75 mm (Nº 4) y sus principales fuentes son la trituración de roca o de grava o por una combinación de ambas, además las partículas deben ser limpias reintentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables. También se debe tener especial cuidado en que las partículas no contengan materiales que puedan afectar la mezcla tales como polvo, tierra, terrones de arcilla. etc. su gradación se deberá ajustar a las señaladas en la tabla 33. Si el tamaño máximo es mayor de 25 mm (1”), el agregado grueso se debe suministrar en las dos fracciones que se muestran en la tabla 35.

Tabla 37. Granulometría para agregado grueso para mezcla de concreto

Tamiz		AG1		AG2		AG3
Normal	Alterno	2" – 1"	1 – N° 4	1 ½" – ¾"	¾" N° 4	1" - N° 4
63.0	2 ½"	100	-	-	-	-
50.0	2"	90-100	-	100	-	-
37.5	1 ½"	35-70	100	90-100	-	100
25.0	1"	0-15	95-100	20-55	100	95-100
19.0	¾"	-	-	0-15	90-100	-
12.5	½"	0-5	25-60	-	-	25-60
9.5	3/8"	-	-	0-5	20-55	-
4.75	N° 4	-	0-10	-	0-10	0-10
2.36	N° 8	-	0-5	-	0.5	0-5

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 500-07

Tabla 38. Requisitos de agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico

Ensayo		Norma de ensayo	Requerimiento
Dureza			
Desgaste los Ángeles.	En seco 500 revoluciones % máximo.	E – 218 E – 219	40
	En seco, 100 revoluciones % máx.		8
	Después de 48 horas de inmersión, 500 revoluciones, % máximo		60
	Relación Húmedo/ seco 500 revoluciones, máximo		2
Resistencia al desgaste usando el equipo Micro-Deval, % máximo		E-238	30
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos	Valor en seco, kN, mínimo	E-224	90
	relación húmedo/ seco, % mínimo		75
Durabilidad			

Ensayo		Norma de ensayo	Requerimiento
Perdida en ensayo de solidos en sulfato, % máximo	Sulfato de sodio	E-220	12
	Sulfato de magnesio	E-220	18
Limpieza			
Terrones de arcilla y partícula deleznable, % máximo.		E-211	0.25
Partículas livianas, % máximo.		E-221	0.5
Geometría de las partículas			
Partículas fracturadas mecánicamente (una cara), % mínimo		E-227	60
Partículas planas y alargadas (relación 5:1), % máximo		E-240	10
Características químicas			
Contenido de sulfatos, expresado como $\text{SO}_4^{=}$, %máximo.		E-233	1.0

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 500-07

❖ Agua

El INVIAS hace las siguientes recomendación para el agua que se usa para la mezcla o para el curado del pavimento de concreto hidráulico debe ser limpia y libre de aceites, ácidos, azúcar, materia orgánica y cualquier otra sustancia que sea perjudicial al pavimento terminado. En general, se considera adecuada el agua potable y esta se podrá emplear sin necesidad de realizar ensayos de calificación.

Cuando se empleen otras fuentes o cuando se mezcle agua de dos o más procedencias, el agua debe ser calificada mediante ensayos. Los requisitos primarios para esta calificación son los que se mencionan en la siguiente tabla.

Tabla 39. Requisitos para el agua de mezcla

PROPIEDADES	NORMAS DE ENSAYO	LIMITES
pH	ASTM D 1293	5.5-8.5
Resistencia a compresión , % mínimo en control a 7 días	ASTM C 39	90
Tiempo de fraguado, desviación respecto del tiempo de control (h:min)	ASTM C 403	De 1:00 inicial a 1:30 final

Fuente: Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Artículo 500-07

❖ **Aditivos**

Para el diseño de mezclas de concreto hidráulico se pueden emplear aditivos de reconocida calidad para modificar las propiedades del concreto. Su empleo se debe definir por medio de ensayos efectuados con antelación a la obra, con las dosificaciones que garanticen el efecto deseado, sin que se perturben las propiedades restantes de la mezcla, ni representen peligro para la armadura que pueda tener el pavimento. Unos de los aditivos que se pueden emplear son;

- ✓ Incluidores de aire, los cuales deben cumplir los requerimientos de la especificación ASTM C260. El agente incluido de aire debe ser compatible con cualquier aditivo reductor de agua que se utilice.
- ✓ Aditivos químicos, que pueden ser reductores de agua, acelerantes de fraguado y retardantes de fraguado, los cuales deben cumplir los requerimientos de la especificación ASTM C 494, incluyendo el ensayo de

resistencia a la flexión. Los aditivos reductores de agua se deben incorporar en la mezcla separadamente de los inclusores de aire, de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

4. DIMENSIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

El dimensionamiento de una estructura de pavimento constituye la aplicación práctica de la mecánica de pavimentos, la cual tiene como principal objetivo determinar los espesores de las capas que comprenden el sistema de la infraestructura. Es importante tener en cuenta que los materiales que componen cada una de estas capas poseen propiedades y características previamente definidas, de tal forma que el conjunto de capas sea capaz de soportar el tráfico durante su vida útil, bajo determinadas condiciones climáticas y ambientales. Las variables más influyentes en las dimensiones de la estructura son:

- ✓ La carga del tránsito
- ✓ La capacidad del soporte de la estructura o subrasante
- ✓ La capacidad mecánica de los materiales en las diferentes capas
- ✓ El clima, principalmente la precipitación y la temperatura
- ✓ Los costos de los materiales
- ✓ Los costos de construcción y de mantenimiento

4.1. TRANSITO

Una de las variables más importantes en el dimensionamiento y construcción de un pavimento es el tránsito, ya que el número de pasadas y la magnitud de las cargas son factores determinante en el diseño de la estructura. El número de pasadas porque el pavimento sufre un deterioro que aumenta progresivamente con el paso de los vehículos, las deformaciones se van acumulando hasta que

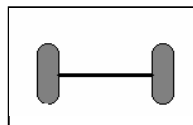
llegan a ser notorias y las fisuras progresan hasta ocupar áreas de la calzada de la vía.

4.1.1. Definiciones

A continuación se hacen algunas definiciones, para tener un mejor conocimiento de la clase de vehículos que transitan las vías.

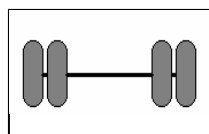
- ✓ *Eje sencillo*: Es el eje que está compuesto por dos ruedas, una en cada extremo del eje.

Figura 29. Eje sencillo de rueda sencilla



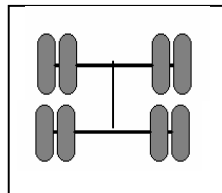
- ✓ *Eje sencillo de rueda doble*: Es el que está compuesto de cuatro ruedas de igual medida de fabricación, dos ruedas en cada extremo del eje, como el eje trasero del vehículo de la figura 30.

Figura 30. Sencillo de rueda doble



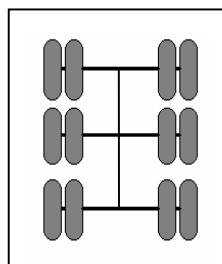
- ✓ *Eje tándem:* este esta formado por dos ejes sencillos con rueda doble en los extremos.

Figura 31. Eje tándem



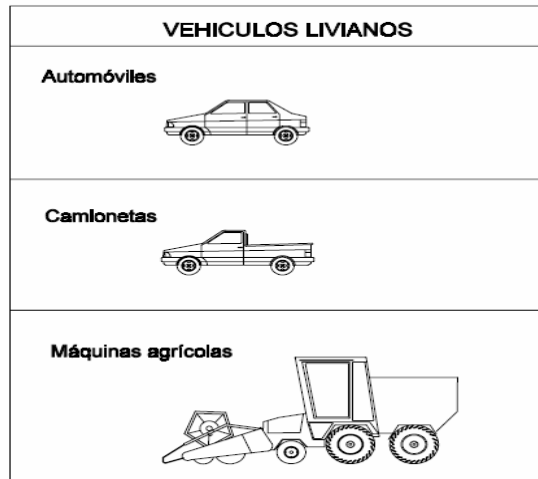
- ✓ *Eje tridem:* esta formado por tres ejes sencillos con rueda doble en los extremos.
- ✓

Figura 32. Eje tridem



- ✓ *Vehículos livianos:* son los que presentan capacidad menor a 5 toneladas, entre estos tenemos, automóviles, camperos, camionetas, etc.

Figura 33. Algunos vehículos livianos



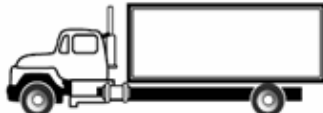

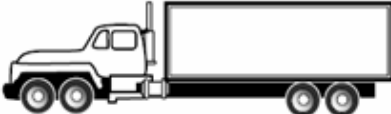




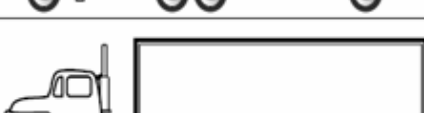
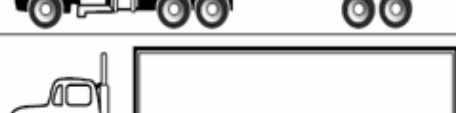
- ✓ *Vehículos comerciales:* son aquellos de más de 5 toneladas de capacidad como camiones, buses, etc.
- ✓ *Transito Promedio Diario (TPD):* este es el volumen de transito durante un periodo de tiempo, dividido en el número de días del periodo. El transito promedio diario puede ser Anual, Mensual o Semanal, denominándose TPSA, TPDM, TPDS, respectivamente. El TPM se halla realizando un conteo, durante una semana, de todos los vehículos que pasan por la carretera la cual se esta analizando. Posteriormente el transito total registrado se divide por los siete días del conteo obteniéndose así el TPDS, el cual debe discriminarse en vehículos livianos y vehículos comerciales. Sendo estos últimos los que en realidad se tienen en cuenta para de dimensionamiento de un pavimento.
- ✓ *Transito existente:* Es el que presenta una vía antes de ser pavimentada
- ✓ *Transito atraído:* Es el que puede ocupar la futura vía, sin cambiar ni su origen, ni su destino, ocuparan la carretera, como vía alterna, afluyendo a ella a través de otra vías existentes.

- ✓ *Transito generado en una vía nueva o mejorada:* Es el volumen de transito que resulta como consecuencia del desarrollo económico y social de la nueva zona de influencia.
- ✓ *Transito inducido:* Es la suma de transito inducido mas el generado.








4.1.2. Clasificación de los vehículos

Para el diseño de estructuras de pavimento se suele descartarse los automóviles y busetas, ya que el deterioro estructural que estos vehículos producen al pavimento, es reducido con relación al que producen vehículos de otras categorías. En Colombia la clasificación de los vehículos esta reglamentada por la norma ICONTEC, que es la que se presenta a continuación:










Tabla 40. Clasificación de los vehículos en Colombia según ICONTEC

DESIGNACION	ESQUEMA VEHICULO
2	
3	
4	
2 S 1	
2 S 2	
2 S 3	
3 S 1	
3 S 2	
3 S 3	

Continuación de la tabla 40.

DESIGNACION	ESQUEMA VEHICULO
2 R 2	
2 R 3	
3 R 2	
3 R 3	
4 R 2	
4 R 3	
4 R 4	

Continuación de la tabla 40.

DESIGNACION	ESQUEMA VEHICULO
2B 1	
2 B 2	
2 B 3	
3 B 1	
3 B 2	
3 B 3	
4 B 1	
4 B 2	
4 B 3	

4.1.3. La Carga de Diseño

En el dimensionamiento de pavimentos la carga de tránsito se ha tratado usualmente de dos maneras:

La primera, consiste en convertir el paso de diferentes vehículos y cargas en el paso de un número dado de un eje prototipo.

La segunda, consiste en calcular el daño que puede ocasionar un grupo de vehículos o grupo de ejes, comparando para cada grupo el número de cargas que pasan con el número de cargas que podría soportar el pavimento. El daño acumulado será la suma de los daños ocasionados por cada uno de los grupos.

❖ Conversión del tránsito mixto en aplicaciones de carga del eje de referencia

Para facilitar el proceso de dimensionamiento de pavimentos la AASHTO ideó una forma para transformar el número de repeticiones de los diferentes tipos y pesos de ejes que circulan por una carretera, en repeticiones o aplicaciones de un eje simple de rueda doble de 80 KN (18 kips) de peso, que es considerando como eje patrón.

Algunos de los parámetros que intervienen en la conversión del tránsito mixto en aplicaciones de carga del eje de referencia son:

→ *Factor Camión:* Es el número de aplicaciones de ejes sencillos con carga equivalente de 8.2 toneladas, correspondientes al paso de un vehículo comercial.

El uso de conteo y pesaje de los vehículos, es la forma mas exacto para obtener el factor camión, pero debido a que estos estudios son muy costosos, se tiene que recurrir a otras opciones como son: tomar el valor correspondiente a una vía semejante, del cual se posea dicha información, si se considera que las característica del transito el los dos tramos es similar o estimar el factor camión a través de algún otro procedimiento tipo empírico como:

Tabla 41. Factores de equivalencia de carga para diferentes tipos de vehículos

Tipo de vehículos	Factores de equivalencia de carga vehicular (Eje simple de 80 kN)			
	Mopt-Igeroute	Encuesta 1992	Encuesta 1996	Encuesta 2000
C-2	1.4	2.16	3.44	2.34
C-3	2.4	4.39	3.76	3.42
C2 - S1	-	-	3.37	2.86
C4	367	-	-	-
C3 - S1	-	-	2.22	2.49
C2 - S2	-	4.21	4.40	4.16
C3 - S2	4.67	4.42	4.72	4.50
C3 - S3	5.0	4.42	4.72	4.50

→ *Proporción de vehículos comerciales circulante en una dirección que utilizan el carril de diseño D_c*

Tabla 42. Factor de distribución por carril (DC) según el manual de diseño de pavimento asfálticos en vías con medio y altos volúmenes de tránsito del INVIAS y el método AASHTO 2002

Número de carriles en cada sentido	Factor de distribución para el carril de diseño (DC)	
	INVIAS	AASHTO 2002
1	1.0	1.0
2	0.90	0.9
3	0.75	0.6
4	Sin información	0.4

A continuación se presenta la ecuación para determinar el Número de Ejes Simples Equivalentes (NESE) de 80 kN en el carril de diseño durante un año (i), la cual permite hacer las estimaciones tanto del tránsito que ya ha circulado sobre el pavimento como el del tránsito previsto a futuro.

En Pavimentos flexibles:

$$NESE_i = TPD_i * D_D * D_C * VC * FC * 365 \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

NESE_i : Tránsito acumulado en el primer año, en ejes equivalentes sencillos de 8.2 ton, en el carril de diseño.

TPDi : Tránsito promedio diario en ambas direcciones, durante el año (i)

- D_D : Distribución direccional; del tránsito de vehículos comerciales generalmente se considera que la mitad de vehículos circula en cada dirección entonces ($D_D= 0.5$).
- D_c : Proporción de vehículos comerciales circulante en una dirección que utilizan el carril de diseño
- VC : Proporción del TPD que está constituido por vehículos comerciales
- FC : Factor camión

✓ **Factor de ejes equivalentes (FE)**

El factor de equivalencia es el cociente que resulta entre el número de ejes de una configuración y peso, necesarios para originar una determinada pérdida de serviciabilidad, respecto del número de ejes patrón requerido para producir la misma pérdida de serviciabilidad, el valor de este cociente es el Factor de ejes equivalentes.

$$\log\left(\frac{N_x}{N_{18}}\right) = 4.79 * \log(18 + 1) - 4.79 \log(L_x + L_{2x}) + 4.33 \log L_{2x} + \frac{G_t}{\beta_x} + \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$G = \log\left[\frac{4.2 - \rho_t}{4.2 - 1.5}\right] \quad \text{Ecuación (10)}$$

$$\beta = 0.4 + \left[\frac{0.081(L_x + L_{2x})^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_{2x}^{3.23}} \right] \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

N_x : Número de ejes de un peso de 18 kips o 8.2 ton.

N₁₈: Número de ejes de un peso x

SN: Número estructural: Número abstracto que expresa la capacidad estructural requerida por el pavimento para condiciones dadas de calidad de suelo, condiciones de tráfico, variación de serviciabilidad durante la vida útil del pavimento y condiciones ambientales.

L_x: Eje de carga a ser evaluado en (kips)

L_{2x}: Código de configuración de eje evaluado (1: Eje simple)
(2: Eje tándem)
(3: Eje triple)

La siguiente es la forma simplificada para el cálculo del el factor equivalente:

$$FE = \left(\frac{\text{Peso del eje}}{\text{Peso del eje de referencia}} \right)^n \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde n es un coeficiente empírico y su valor esta entre 3 y 6. Pero en Colombia el valor de n más usado es $n=4$.

Tabla 43. Cargas de referencia adoptadas por el Instituto Nacional del Vías para el diseño de pavimentos asfálticos

Tipo de eje	Carga de referencia	
	kN	Ton.
Eje sencillo de rueda simple	65	6.6
Eje sencillo de rueda doble	80	8.2
Eje tándem de rueda doble	146	15.0

Tipo de eje	Carga de referencia	
	kN	Ton.
Eje triple de rueda doble	225	23.0

En Pavimentos Rígidos

- ✓ Factor de Equivalencia del Tráfico. - Las fórmulas que permiten convertir el número de ejes de pesos normales a ejes equivalentes dependen del espesor del pavimento, de la carga del eje, del tipo de eje y de la serviciabilidad final que pretendemos para el pavimento. A continuación se muestran dichas fórmulas:

$$Feq = \frac{N_{18}}{N_x}$$

$$\log\left(\frac{N_x}{N_{18}}\right) = 4.62 \log(18+1) - 4.62 \log(L_x + L_2) + 3.28 \log(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$G_t = \log\left(\frac{4.5 - P_t}{4.5 - 1.5}\right) \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$\beta_x = 1 + \frac{3.63(L_x + L_2)^{5.2}}{(D + 1)^{8.46} * L_2^{3.52}} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

N_x : número de aplicaciones de carga definida al final del tiempo t

N_{18} : número de aplicaciones de carga equivalente al final del tiempo t

L_2 : Código de eje cargado: $L_2 = 1$ Para eje Sencillo
 $L_2 = 2$ Para eje Tándem
 $L_2 = 3$ Para eje Tridem

$G_t = f(Pt)$

β_{18} : Valor de β_x cuando $L_x=18$ y $L_2 = 1$

✓ **Determinación del número de ejes equivalente de 8.2 toneladas en el carril de diseño y durante el periodo de diseño (N)**

Después de obtener el número acumulado de vehículos que transitan en el carril de diseño y durante el periodo diseño, es posible convertir esta cantidad de vehículos comerciales a ejes simple equivalentes de 8.2 ton mediante el factor camión:

$$N = TPD * \frac{A}{100} * \frac{B}{100} * 365 * \frac{(1+r)^n - 1}{\ln(1+r)} * FC$$

Ecuación (16)

Donde:

TPD : Tránsito promedio diario anual

A : Porcentaje estimado de vehículos pesados (camiones y buses).

B : Porcentaje de vehículos pesados que emplean el carril de diseño.

r : Rata anual de crecimiento del tránsito.

n : Periodo de diseño

F.C. : Factor camión

❖ **Procedimiento de diseño para el caso en que se disponga de datos sobre distribución de carga por eje.**

Este método se puede emplear una vez que ya se hayan obtenido los datos del tráfico esperado, como lo es el tránsito diario promedio anual, la composición vehicular del tráfico y de esta información obtenemos el número de repeticiones esperadas para cada tipo de eje durante el período de diseño.

Para resolver el diseño de pavimentos se requiere conocer algunos factores de diseño, como:

- Tipo de junta y bermas.
- Resistencia a la flexión del concreto (M_R) a 28 días.
- El valor del módulo de reacción K del terreno de apoyo, el cual puede ser solamente la subrasante o el conjunto de subrasante - subbase.
- Factor de seguridad de la carga (F_{sc})
- Número de repeticiones esperadas durante el período de diseño, para cada tipo y peso de eje.

El espesor de la losa se establece calculando el consumo de fatiga y de erosión de la estructura sometida a cargas, para esto se emplea la ley de Miner, en la cual se calcula el daño acumulado

$$D = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + \dots + d_n \quad \text{Ecuación (17)}$$

En donde el daño acumulado D es el resultado de la suma de los daños parciales ($d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_n$), y cada daño es el resultado

de comparar las repeticiones de carga que va a soportar el pavimentos con las repeticiones que producirían la falla de la estructura ya sea por fatiga o por erosión.

$$d = \frac{n}{N} \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde:

n : número de cargas esperadas

N : número de cargas que puede soportar la estructura.

4.2. MÉTODOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

En la actualidad existen diversos métodos para el dimensionamiento de pavimentos flexibles entre los cuales destacamos los siguientes:

- ❖ Métodos empíricos
- ❖ Métodos mecanísticos

4.2.1. Métodos empíricos

En el dimensionamiento de pavimentos, se han empleado métodos empíricos que aunque no ofrecen un excelente grado de exactitud en los resultados que brindan, si proporcionan grandes ventajas como son simplicidad y rapidez. En estos métodos se caracterizan los suelos por una serie de ensayos los cuales solamente se limitan a registrar características puramente físicas, con estas se define un

parámetro, el cual es el único valor representativo de resistencia del suelo con lo cual se procede a realizar el diseño de la estructura de pavimento.

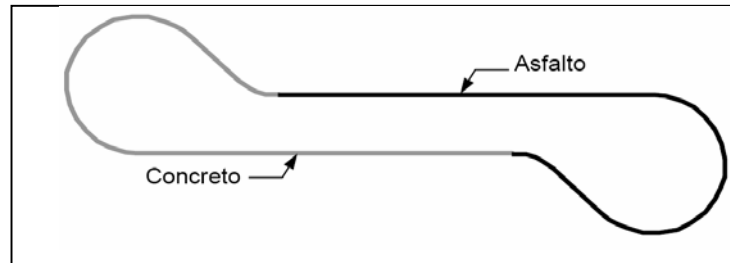
❖ MÉTODO AASHTO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

En sus comienzos la prueba de pavimentación se conoció como AASHO (American Association of State Highway Officials), por sus siglas en inglés debido que en esa época el departamento del transporte de Estados Unidos no se había integrado a esta organización. Esta prueba fue formulada por el consejo de investigación de carreteras de la academia nacional de ciencias (consejo nacional para la investigación), la planeación empezó en 1951, la construcción del proyecto comenzó en 1956 muy cerca de Ottawa, Illinois.

El principal objetivo de las pruebas era determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento y las cargas aplicadas sobre ellas y además determinar las relaciones entre un número de repeticiones de ejes con cargas, de diferente magnitud y disposición, y el comportamiento de diferente espesores de pavimentos, conformados con bases y subbases, colocados en suelos de características conocidas.

Los pavimentos que se usaron para las pruebas fueron 6 circuitos diferentes, todos eran tramos de dos carriles y tenían la mitad del tramo en pavimento de concreto y la otra en pavimento flexible.

Figura 34. Ejemplo de circuito usado en la prueba AASHO



Aproximadamente después de un año de terminar la prueba AASHO, para 1961 salió publicada la primer “Guía AASHO para Diseño de Pavimentos”. Posteriormente para 1972 se realizó una revisión y se publicó como la “Guía AASHO (American Association of State Highway and Transportation Officials), para Diseño de Estructuras de Pavimento – 1972”; Para 1981 se hizo una Revisión al Capítulo III, correspondiente al Diseño de Pavimentos de Concreto con Cemento Portland, y en 1986 se hizo evidente que había diversos factores adicionales que afectaban el diseño de pavimentos y que eran necesario tenerlos en cuenta o mejorar algunos de estos parámetros como son: los cambios en las cargas, algunas propiedades de los materiales, características de diseño, condiciones de drenaje y los efecto climático.

En 1993 se publica una nueva versión de la guía en la que se describe con detalle los procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles, además 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.

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.

➤ **Variables para el diseño**

- ◆ **Restricciones de tiempo:** Existen dos variables a tener en cuenta con respecto al tiempo las cuales son: periodo de análisis y periodo de diseño o de vida útil. El periodo de diseño es el tiempo que dura una estructura de pavimento antes de que requiera algún tipo de rehabilitación o el momento en que este alcanza un grado de serviciabilidad mínimo y también puede ser el lapso entre dos rehabilitaciones sucesivas. El periodo de análisis es el tiempo total que cada estrategia de diseño debe cubrir. Puede ser igual que la vida útil, pero en casos en donde se prevén reconstrucción a lo largo del tiempo, el periodo de análisis comprende varios periodos de vida útil.
- ◆ **Tránsito:** Para el cálculo del tránsito, el método contempla los ejes equivalentes sencillos de 18,000 lb (8.2 ton) acumulados durante el período de diseño, los cuales se calculan como se menciona anteriormente en el presente capítulo.

Después de calcular los ejes equivalentes acumulados en el primer año, se deberá estimar con base en la tasa de crecimiento anual y el período de diseño en años (el cual depende del tipo de vía a diseñar), los ejes equivalentes acumulados y así contar con un parámetro de entrada para la ecuación general o para el nomograma de la Figura 42.

Tabla 44. Periodos de diseño en función del tipo de carretera

Tipo de carretera	Periodo 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

- ◆ **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.

Tabla 45. Valores de “R” de confiabilidad

CLASIFICACIÓN	NIVEL RECOMENDADO POR AASHTO PARA CARRETERAS	
	Urbana	Rural
Carretera interestatal y otras	80-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-95
Colectoras de transito	80-95	75-95
Carreteras locales	50-80	50-80

- ◆ **Desviación estándar global “So”**. Este parámetro está ligado directamente con la Confiabilidad (R) que fue descrita anteriormente, el valor de desviación estándar global debe ser un valor representativo de las condiciones locales particulares, el cual debe considerar posibles

variaciones en el comportamiento del pavimento y en la predicción del tránsito. Según el método, para el diseño de pavimentos flexibles el valor que se toma de desviación estándar global es de 0.45.

- ◆ **Efectos ambientales.** La guía AASHTO de 1993 si tienen en cuenta los factores ambientales ya que la interacción entre los agentes climáticos con los materiales y las cargas, son muy importantes en el desempeño de los pavimentos flexibles debido a la diversidad de problemas que estas interacciones pueden causar. Factores como la precipitación, temperatura, ciclos hielo-deshielo y profundidad de la capa, afectan el contenido de humedad del pavimento y de la subrasante, incidiendo directamente en la capacidad de soporte de las capas del pavimento y finalmente en el desempeño del mismo. Además otro gran impacto que puede causar los efectos ambientales, es el efecto de expansión de la subrasante el cual puede afectar la calidad de la rodadura y la serviciabilidad de la estructura.

- ◆ **Características de Subrasante.** La subrasante es el suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural y el cálculo de su resistencia es la base fundamental de este método. La obtención del módulo resiliente efectivo se efectúa de acuerdo con lo especificado en el capítulo 1.

- ◆ **Índice de Serviciabilidad:** La satisfacción de los usuarios se manifiesta, fundamentalmente, por la calidad en que se encuentran los pavimentos o capas de rodadura y los elementos que constituyen la seguridad vial. Los pavimentos, que experimentan un deterioro relativamente acelerado son los que requieren la mayor inversión, por lo que, con el desarrollo masivo de las carreteras pavimentadas, se hizo necesario plantearse el interrogante de cuando intervenir y de cómo medir el nivel de deterioro de un pavimento.

Los criterios más modernos sobre serviciabilidad analizan aspectos que

están relacionados con el deterioro funcional del pavimento, la capacidad estructural del pavimento y la seguridad de los usuarios.

La serviciabilidad funcional del pavimento se define como la percepción de la calidad de la superficie de rodadura que experimenta el usuario al transitar por una vía. Por lo tanto, se relaciona fundamentalmente con la rugosidad o con la regularidad que presenta la superficie, que es el principal factor que define el nivel de la serviciabilidad funcional que prestan las carreteras. Aún cuando las tres condiciones señaladas anteriormente son importantes, y de muchas maneras están ligadas entre sí, no se debe olvidar que las carreteras tienen por finalidad servir al público y que a éste, naturalmente, le interesa fundamentalmente la condición funcional y la seguridad.

La serviciabilidad estructural representa la condición física en que se encuentra el pavimento; depende de las grietas y otras fallas presentes que afectan adversamente la capacidad para soportar las cargas de tránsito que le serán aplicadas.

La seguridad es un concepto nuevo incorporado a la serviciabilidad y está relacionado con la disposición, calidad y cantidad de elementos de seguridad, y con un adecuado diseño vial.

AASHTO (American Association of State Highways and Transportation Officials), fue la primera en sistematizar un procedimiento objetivo para establecer el nivel de deterioro de los pavimentos, procurando relacionar la condición funcional con la estructural y para ello introdujo el concepto de serviciabilidad. La serviciabilidad fue definida como la capacidad de un pavimento para servir al tránsito para el cual fue diseñado. Los pavimentos

fueron calificados con valores extremos que variaban desde 0, para un camino intransitable, hasta 5 para una superficie en perfectas condiciones.

Tabla 46. Nivel de serviciabilidad

Índice de Servicio	Calificación
5	Excelente
4	muy bueno
3	Bueno
2	Regular
1	Malo
0	Intransitable

Además AASHTO sugiere que el índice mas bajo que se puede usar antes de que las vías necesiten ser reforzadas o rehabilitadas, es de 2.5 para autopistas y vías principales y de 2.0 para las demás carreteras.

Teniendo en cuenta que la serviciabilidad final de un pavimento (P_t) depende del transito y del índice de servicio inicial (P_o) es necesario hacer una determinación de este ultimo. Según el ensayo realizado por AASHTO se obtuvo un valor de $P_o=4.2$ para pavimentos flexibles, pero este valor puede variar de acuerdo a las condiciones y características constructivas de cada región. Después de tener los valores de P_o y P_t se aplica la siguiente ecuación para determinar el cambio total en el índice de servicio.

$$\Delta PSI = P_o - P_t \quad \text{Ecuación (19)}$$

donde:

P_o = índice de Inicio del Periodo

P_t = índice de Fin del Periodo

Δ PSI = cambio total en el índice de servicio

- ♦ **Característica de los materiales del pavimento:** El módulo de elasticidad es el principal factor que permite identificar las características de cada una de las capas que conforman una estructura de pavimento, dicho módulo se obtiene a través de ensayos normalizados de laboratorio.

El método AASHTO no presenta requisitos específicos respecto a los materiales que se deben usar en la subbase, lo cual indica que se puede emplear cualquier material convencional. El uso de la subbase según este método requiere el empleo de un coeficiente de capa denominado (a_3) para convertir su espesor en un número estructural (SN) el cual indica el espesor total requerido para un pavimento.

Para la base, la AASHTO indica que puede ser granular o estabilizada y los requisitos de calidad deben ser superiores a los de la subbase. El material estará representado por el coeficiente (a_2) que permite convertir su espesor real a su número estructural.

La capa de rodadura, estará conformada por una mezcla de agregados pétreos y material bituminoso. Esta mezcla deberá ser diseñada para que preste una función estructural, resista las fuerzas abrasivas que producen las cargas de tránsito, proporcione una superficie uniforme, antideslizante y además debe impedir la filtración del agua superficial.

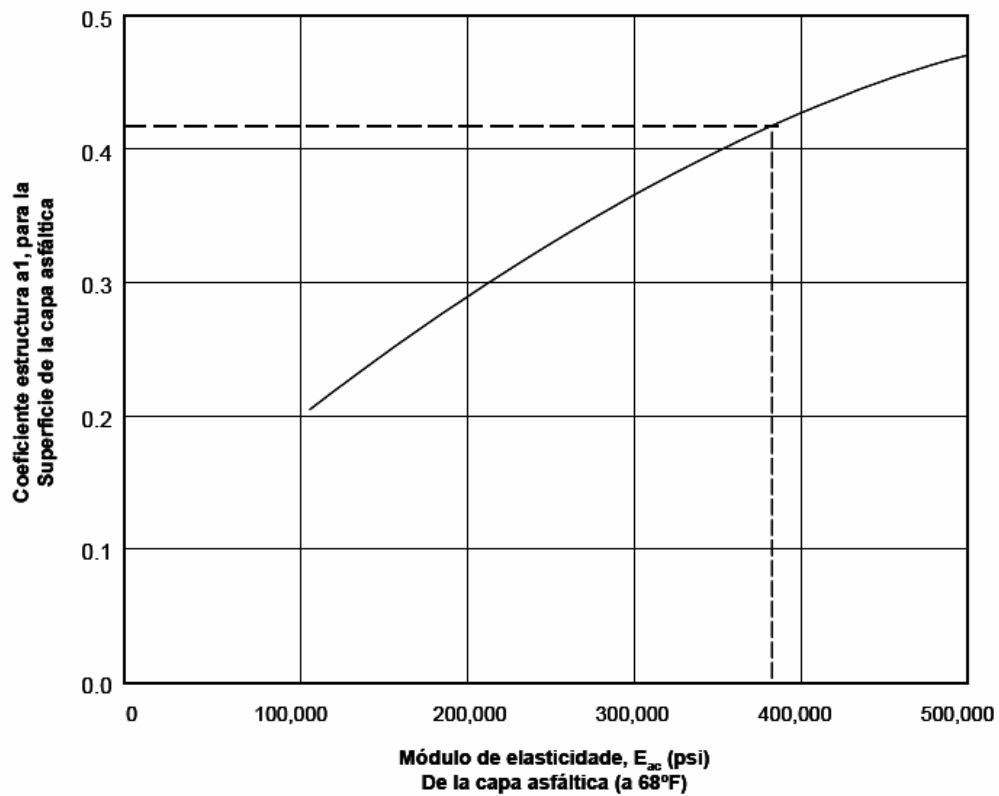
- ♦ **Coeficiente de capas:** Este método establece un coeficiente para cada capa del pavimento (a_i), siendo cada uno de los coeficientes una medida de

la capacidad relativa de cada material para funcionar como parte de la estructura de pavimento. Además estos coeficientes son usados para convenir los espesores reales a números estructurales (SN). El método presenta cinco categorías de estos coeficientes de acuerdo al tipo y función de la capa considerada: concreto asfáltico, base granular, subbase granular, base tratada con cementos y base asfáltica.

- ✓ *Concreto asfáltico*: Las siguientes figuras proporcionan un grafico que puede ser utilizado para obtener el coeficiente (a_1) de la capa estructural de rodadura de concreto asfáltico de gradación densa, con base en su módulo elástico o resiliente a una temperatura de 20 °C.

NOTA: Los coeficientes estructurales mencionados anteriormente y las graficas que se presentan a continuación para la obtención de los mismos, son empleadas en la página 141, en la ecuación 24, para el cálculo de los espesores de una estructura de pavimento.

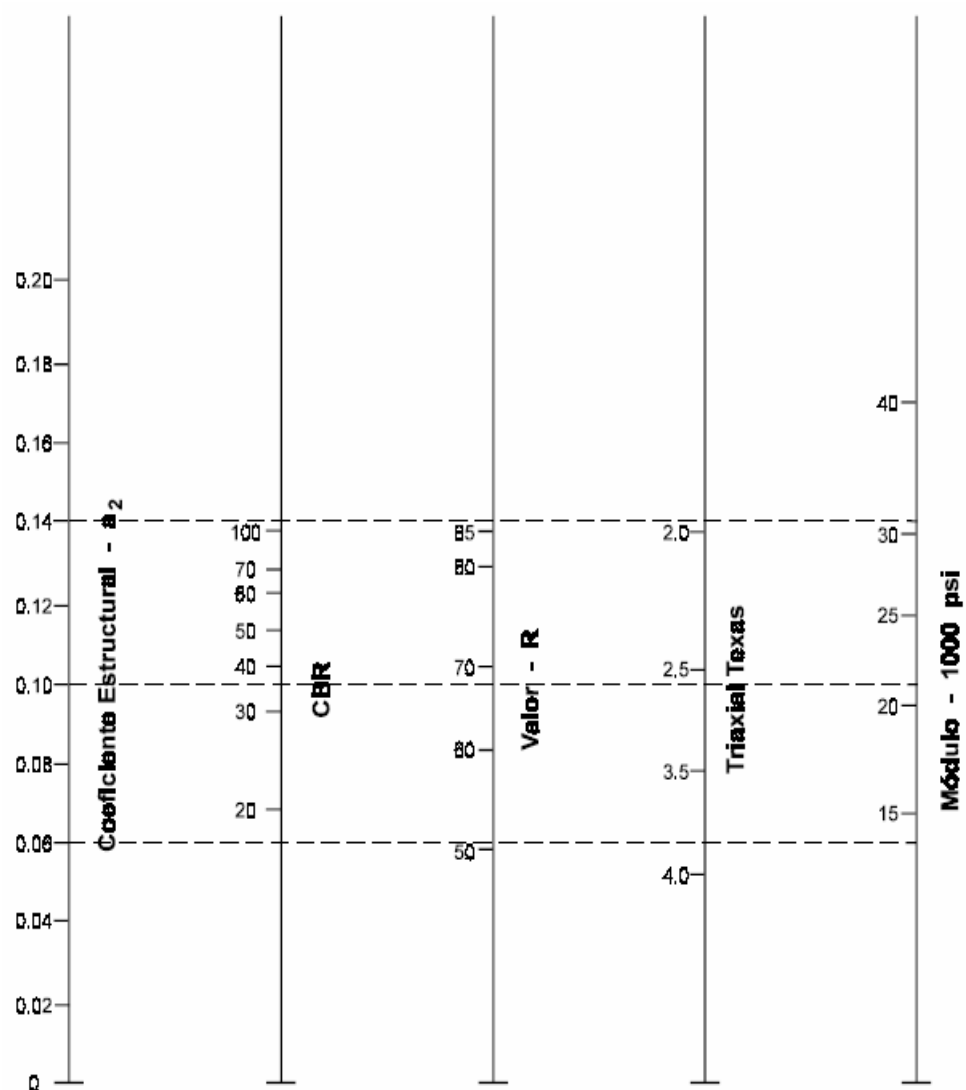
Figura 35. Gráfica para hallar el coeficiente a_1 en función del módulo resiliente del concreto asfáltico



Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993

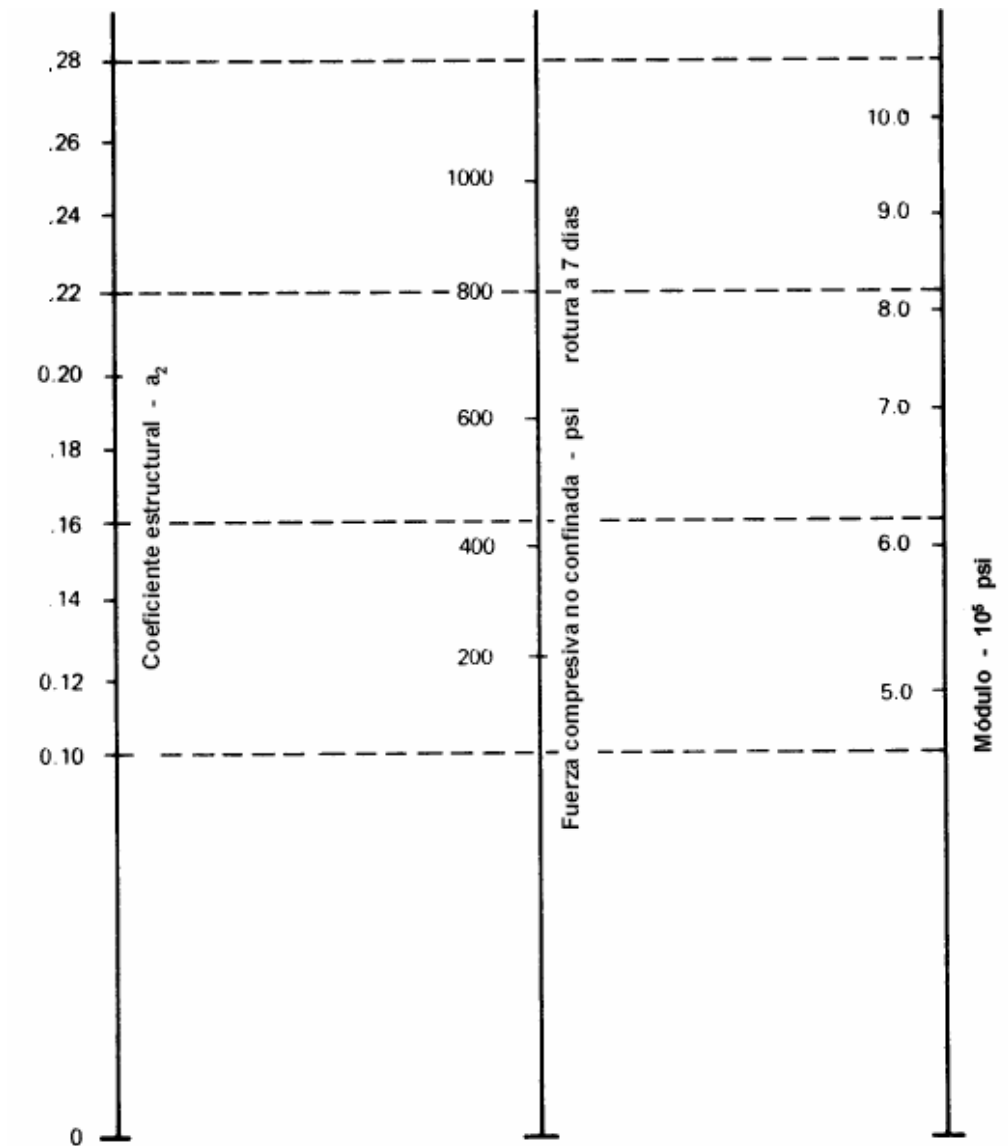
- ✓ *Base granulares*: La figura 36, se pueden usar para obtener el coeficiente estructural (a_2) a partir de uno de cuatro ensayos diferentes sobre un material granular de base.

Figura 36. Variación de coeficiente a_2 con deferente parámetros de resistencia de la base granular



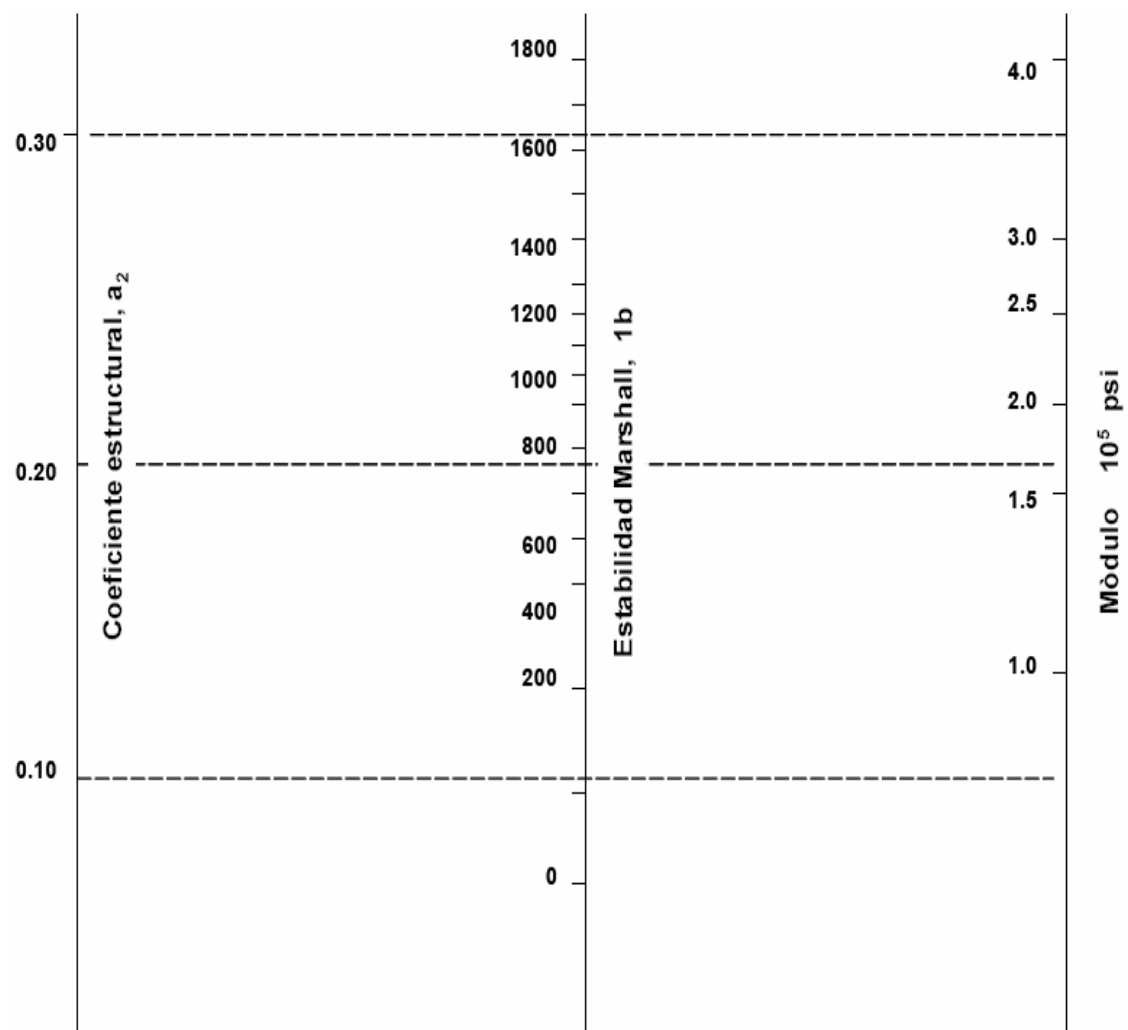
- ✓ *Bases estabilizadas:* La figura 37, se usa para hallar el coeficiente (a_2) de una base de suelo cemento, a partir de su módulo elástico o de su resistencia a compresión a 7 días.

Figura 37. Variación de a_2 en bases tratadas con cemento para diferentes parámetros de resistencia



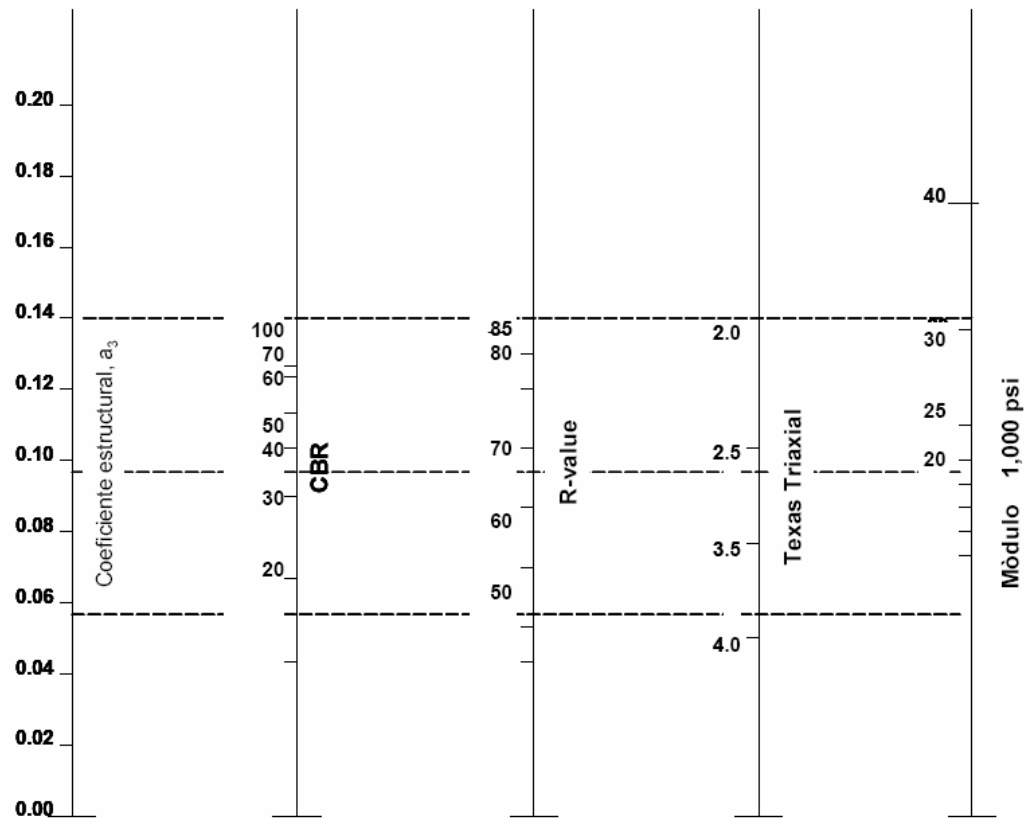
- ✓ La figura (38) muestra el ábaco para obtener el coeficiente de las bases asfálticas, en función de su módulo o su estabilidad Marshall.

Figura 38. Variación de a_2 en bases tratadas con asfalto para diferentes parámetros de resistencia.



- ✓ *Subbases granulares:* Con el siguiente grafico se puede determinar el coeficiente (a_3) para una subbase granular, en función de los mismos ensayos que las bases granulares, los cuales son: El de CBR, valor R, triaxial de Texas y el módulo resiliente.

Figura 39. Variación del coeficiente a_3 con diferentes parámetros de resistencia de la subbase



❖ **Características estructurales del pavimento**

◆ **Tiempo para Drenar:** Este es una aproximación para el diseño de bases permeables, y dependiendo de este valor se pueden obtener indicadores de la calidad del drenaje de una estructura. Para obtener el tiempo de drenajes se presenta a continuación dos posibles aproximaciones diferentes, que son:

- ✓ El 50% de drenaje según AASHTO: AASHTO proporciona la guía basada en el 50% de drenaje del agua libre, pero este no tiene en cuenta el agua retenida por los materiales debido a su porosidad.
- ✓ El 85 % de saturación: Este método si tiene en cuenta el agua que drena la estructura y la que es retenida por la calidad de porosidad efectiva del material.

Tabla 47. Tiempo de drenaje para capas granulares

Calidad del drenaje	50% saturación	85% saturación
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	10 a 15 horas
Muy pobre	El agua no drena	Mayor de 15 horas

Para calcular el tiempo para drenar se puede usar la siguiente ecuación:

$$t = T * m * 24 \quad \text{Ecuación (20)}$$

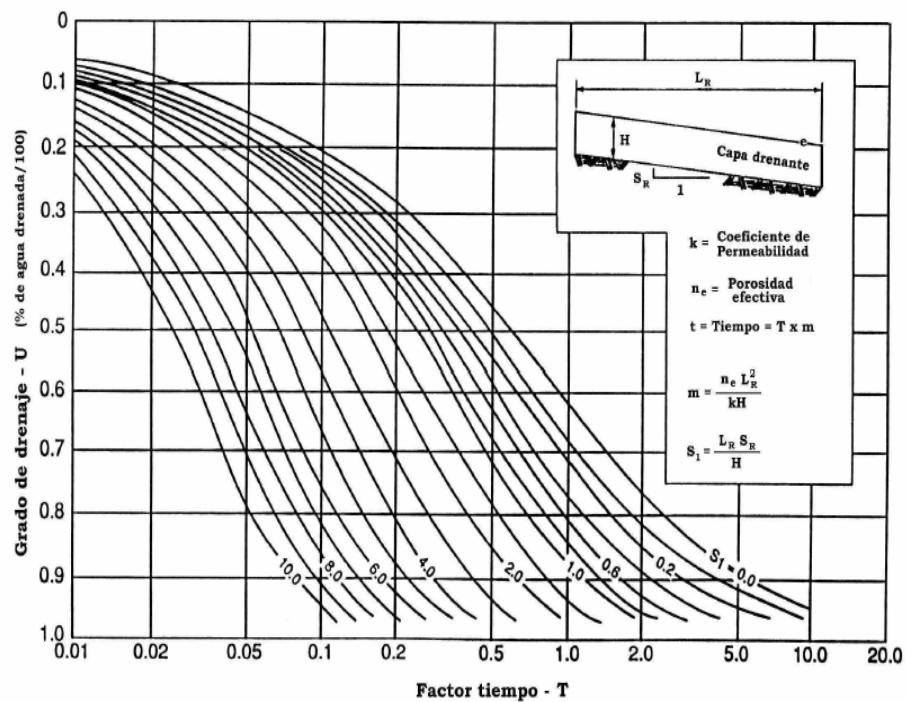
Donde:

t : tiempo para drenar en (horas)

T : Factor tiempo (este se puede obtener usando la figura (21) teniendo en cuenta el porcentaje de agua drenada y un factor de pendiente (S_1).

m : factor "m"

Figura 40. Factor tiempo para drenaje en una capa saturada



Para el calcular del factor pendiente que es un parámetro que esta basado en algunas características geométricas de la capa granular, se presenta la siguiente expresión:

$$S_1 = \left(\frac{L_R * S_R}{H} \right) \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde;

S_1 : Factor de pendiente

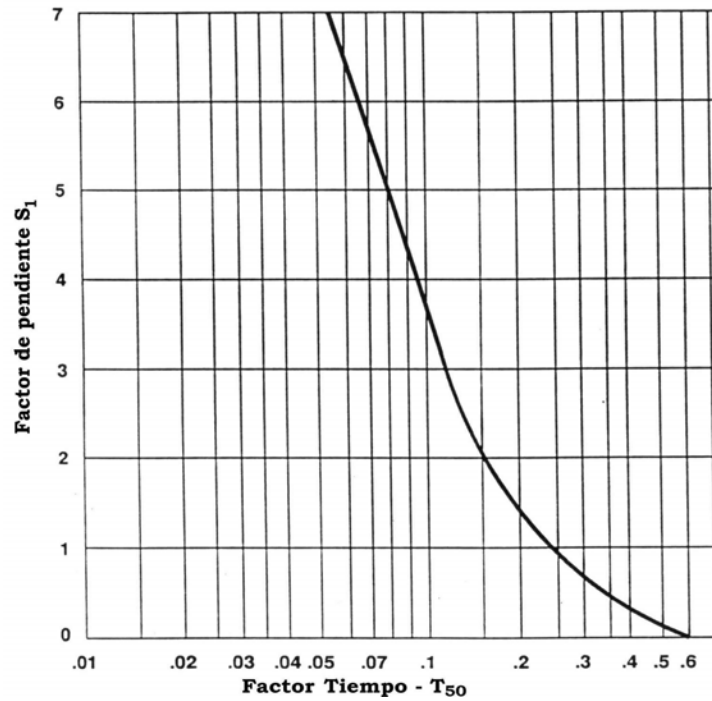
L_R : Longitud de la trayectoria de flujo

S_R : Pendiente resultante, en tanto por uno

H : Espesor de la capa granular

Pero cuando se desea utilizar solamente un grado de drenaje, se presenta el siguiente grafico, el cual esta en función de un valor U de 50%.

Figura 41. Factor tiempo para 50% de drenaje



Y finalmente el factor m para poder atender el factor tiempo, se calcula así:

$$m = \left(\frac{n_e * L_R^2}{k * H} \right) \quad \text{Ecuación (22)}$$

Donde:

- n_e : Porosidad efectiva
- L_R : Longitud de la trayectoria del flujo
- k : Coeficiente de permeabilidad
- H : Espesor de la capa granular

Tabla 48. Coeficiente de drenaje para pavimentos flexibles m_i

Calidad del drenaje	% de tiempo de exposición de la estructura de pavimentos a niveles de humedad próximos a la saturación			
	< 1%	1 - 5 %	5 - 25 %	> 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

❖ **Diseño estructural del pavimento**

◆ **Ecuación de la guía AASHTO para el diseño de pavimentos 1986:** en este año la guía introduce diversos factores como son:

- Concepto de confiabilidad
- Se introduce en Módulo Resiliente en lugar del CBR
- el coeficientes de drenaje *mi* en lugar factores regionales

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \Delta PSI}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log M_R - 8.07 \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde:

W_{18} : Número de aplicaciones de carga de 18 kips

S_o : Desviación estándar de las variables

SN : Número Estructural

ΔPSI : Pérdida de la serviciabilidad prevista en el diseño

M_R : Módulo resiliente de la subrasante

Z_R : Desviación estar normal (Área bajo la curva de distribución estandarizada para una confiabilidad R). Para calcular el valor Z_r se puede usar la siguiente tabla

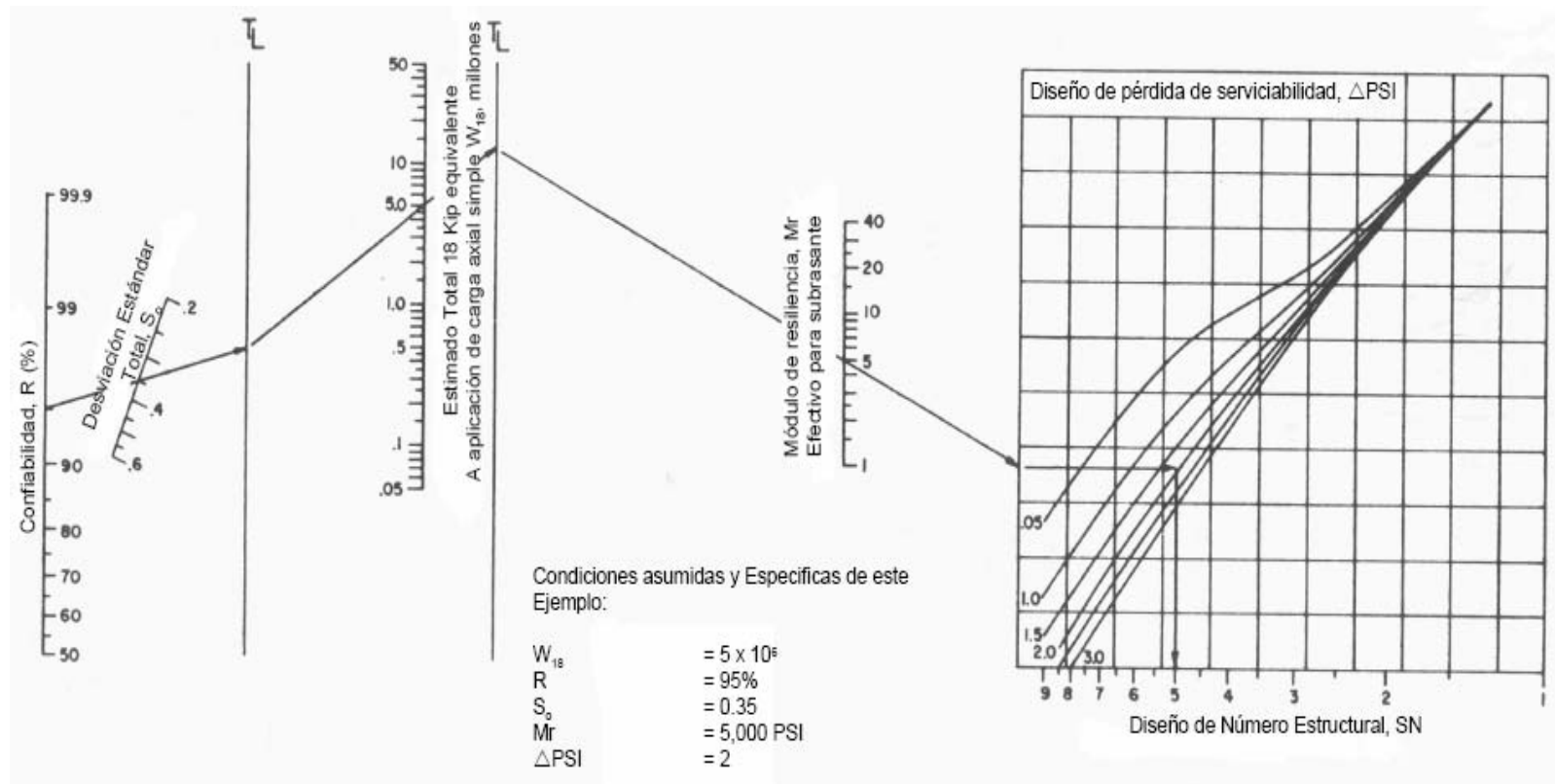
Tabla 49. Valor de desviación estándar Z_R para un determinado porcentaje de confiabilidad

Confiabilidad (R) (%)	Desviación estándar normal (Z_R)
50	-0.00
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

- ◆ **Determinación de número estructural:** Para determinar el número estructural SN requerido, el método proporciona la ecuación general (20) y la gráfica (27) la cual involucra los siguientes parámetros:

- El tránsito en ejes equivalentes acumulados para el período de diseño seleccionado, " W_{18} ".
- El parámetro de confiabilidad, "R".
- La desviación estándar global, "So".
- El módulo de resiliencia efectivo, "Mr" del material usado para la subrasante.
- La pérdida o diferencia entre los índices de servicios inicial y final deseados, durante el periodo de diseño " $\Delta PSI = P_o - P_t$ " ecuación 19.

Figura 42. Gráfica de diseño para pavimentos flexibles basada en valores promedio de los diferentes datos de entrada.



Fuente. Guía para diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1993

- ✓ **Selección de los espesores de las capas:** Una vez obtenido el Número Estructural SN para la sección estructural del pavimento, utilizando el gráfico o la ecuación general básica de diseño, (Figura) donde se involucraron los parámetros anteriormente descritos (tránsito, R, So, 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.

$$SN = a_1 h_1 + a_2 m_2 h_2 + a_3 m_3 h_3 \quad \text{Ecuación (24)}$$

El número estructural se convierte a una combinación de espesores de capa, combinando coeficientes que representan la capacidad estructural relativa del material de cada capa. Esta ecuación no conduce a una solución única, si no que presenta muchas combinaciones técnicamente válidas.

Donde:

SN : Número estructural

a₁, a₂ y a₃ : Coeficientes de capa representativos de carpeta, base y subbase respectivamente.

h₁, h₂ y h₃ : Espesor de la carpeta, base y subbase respectivamente, en pulgadas.

m₂ y m₃ : Coeficientes de drenaje para base y subbase, respectivamente.

Para el cálculo de los espesores h_1 , h_2 y h_3 (en pulgadas), el método sugiere respetar los siguientes valores mínimos, en función del tránsito en ejes equivalentes sencillos acumulados.

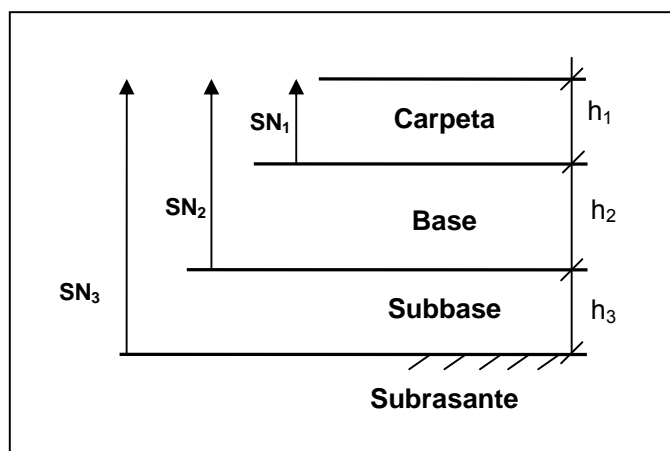
Tabla 50. Espesores mínimos, en pulgadas, en función de los ejes equivalentes.

Nº de ejes equivalentes (millones)	Concreto asfáltico	Base granular
< 0.05	1.0	4
0.05 - 0.15	2.0	4
0.15 - 0.50	2.5	4
0.50 - 2.00	3.0	6
2.00 - 7.00	3.5	6
> 7.00	4.0	6

- ◆ **Análisis de diseños por capas:** Debido a que el pavimento es un sistema multicapa, la distribución de los espesores debe hacerse 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 mínimo permitido de cualquier capa puede ser calculado. Por ejemplo, el número estructural mínimo 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.

Figura 43. Determinación de los espesores de las capas mediante aproximaciones



$$h_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN_1^* = a_1 h_1^* \geq SN_1$$

$$h_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 m_2}$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

$$h_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

Nota: *a) los valores de a, h, m y SN son los valores mínimos requeridos.*

b) el asterisco () que se coloca en D y SN se hace para indicar que estos valores son los realmente usados, los cuales tienen que ser mayores o iguales al los requeridos*

Ejemplos resueltos:

1. Dimensionar la estructura de un pavimento flexible teniendo los siguientes datos:

$$N = 10^6 \text{ años}$$

Subrasante con un CBR = 6%

Confiabilidad = 95%

$$S_o = 0.45$$

$$\Delta PSI = 2$$

Solución:

a. Cálculo del módulo resiliente: Usar ecuación (5)

$$Mr (\text{psi}) = 1500 * \text{CBR} \quad \Rightarrow \quad Mr = 1500 (6) = 9000 \text{ Psi}$$

b. Cálculo del valor de la desviación estándar normal: para obtener este valor se emplea la tabla (49) la cual está en función de el valor de confiabilidad.

$$\Rightarrow Z_R = -1.645$$

- c. Teniendo estos valores se utiliza la ecuación (23) o la figura (42) para obtener el valor del SN. (Número estructural).

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\frac{\log \Delta PSI}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log M_R - 8.07$$

$$\Rightarrow \log W_{18} = (-1.645)(0.45) + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\frac{\log(2)}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log(9000) - 8.07$$

Despejando con la ayuda de una calculadora se obtiene el valor de SN

$$\Rightarrow SN = 4.72 \text{ plg}$$

- d. Se determinan los coeficientes estructurales para cada una de las capas

Con la ayuda de las figura 35, 36, y 39, se obtiene el valor de el coeficiente estructura respectivamente: $a_1=0.44$, $a_2=0.14$ y $a_3=0.11$.

- e. Como la zona presenta condiciones de drenaje buenas y un porcentaje cercano a la saturación del 10%, el coeficiente de drenaje para la base y subbase son: $m_2 = m_3 = 1$.

$$4.72 = a_1 h_1 + a_2 m_2 h_2 + a_3 m_3 h_3$$

Se toman los valores de espesor mínimos requeridos para la capa asfáltica y para la base granular, según la tabla (50) y de esta forma se puede obtener el valor del espesor de la subbase.

Para el número de ejes equivalentes que tiene el ejemplo de 10`000.000 los valores correspondientes a los espesores mínimos son: de $h_1 = 4$ plg. y $h_2 = 6$ plg.

$$4.72 = 0.44(4) + 0.14(1)(6) + 0.11(1)h_3$$

$$\Rightarrow h_3 = 19.27 \text{ plg.}$$

- f. Debido a que el valor es demasiado grande, se aumentan los valores mínimos de espesores para las capas de concreto asfáltico y la base granular a 6 y 8 plg respectivamente.

$$4.72 = 0.44(6) + 0.14(1)(8) + 0.11(1)h_3$$

$$\Rightarrow h_3 = 8.73 \text{ plg.}$$

2. Diseñar un pavimento flexible teniendo en cuenta que el periodo de diseño es de 15 años, N en el periodo de diseño de 7×10^6 de ejes equivalentes en el carril de diseño, coeficiente de confiabilidad de 90%, la desviación estándar es de 0.45, el índice de servicio inicial $P_0 = 4.3$ y se selecciono un $P_t = 2$. Las condiciones de drenaje son buenas y el % de tiempo cercano a la saturación es de 10 %, por lo tanto $m_i = 1$

Se utilizara para la capa asfáltica una MDO-2 (Mezcla densa en caliente tipo 2) la cual a una temperatura de (20°C), presenta un módulo elástico de 400000 psi. El suelo de la subrasante presenta un CBR=5% y los materiales

disponibles para la base y subbase presenta un CBR de 25 y 80% respectivamente.

Solución:

a. Con los valores de índice de servicio inicial y final, se calcula con la ecuación (16) el cambio total en el índice de servicio ΔPSI .

$$\Delta PSI = P_o - P_t \quad \Rightarrow \quad \Delta PSI = 4.3 - 2 = 2.3$$

b. Con el valor del CBR de la subrasante, se calcula el Módulo resiliente da la misma. Usar la ecuación (5).

$$Mr \text{ (psi)} = 1500 * \text{CBR} \quad \Rightarrow \quad Mr = 1500 (5) = 7500 \text{ Psi}$$

c. Determinación del módulo de elasticidad de la capa base y subbase granular. Usando las figuras 36 y 39 respectivamente.

- Base: su CBR=80%, según la tabla (36) para este valor de CBR, le corresponde un valor de módulo de elasticidad $E_B=28000$ psi y un coeficiente estructural $a_2=0.13$.
- Subbase: su CBR=25%, según la tabla (39) para este valor de CBR, le corresponde un valor de módulo de elasticidad $E_{SB}=13800$ psi y un coeficiente estructural $a_3=0.1$.

d. Calculo del valor de la desviación estándar normal: para obtener este valor se emplea la tabla (49) la cual esta en función de el valor de confiabilidad.

$$\Rightarrow Z_R = -1.282$$

- e. Con la ecuación (23) o con la figura (42) se obtiene el valor de SN (volumen estructural del pavimento) a partir del módulo resiliente de la subrasante.

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \Delta PSI}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log M_R - 8.07$$

$$7 \times 10^6 = (-1,282)(0.45) + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log(2.3)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log(28000) - 8.07$$

Despejando con la ayuda de una calculadora se obtiene el valor de SN

$$\Rightarrow SN = 4.36$$

- f. Con la ecuación (23) o con la figura (42) se obtiene el valor de SN₁ (número estructural sobre la base), pero ahora usando el módulo de elasticidad de la base E_B=28000 psi.

$$7 \times 10^6 = (-1,282)(0.45) + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log(2.3)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log(7500) - 8.07$$

Despejando con la ayuda de una calculadora se obtiene el valor de SN

$$\Rightarrow SN = 3.8$$

- g. Con la ayuda de las figura (35) se obtiene el valor de el coeficiente a₁, entrando a la gráfica en las abscisas con el valor del módulo elástico asfáltico y leyendo en valor a₁ en las ordenadas el cual es a₁ =0.42

Entonces teniendo en cuenta que $SN_{BG} = a_1 * h_1$

$$h_{CA} = \frac{SN_{BG}}{a_1} = 5.5 \Rightarrow h_{CA} = \frac{2.3}{0.42} = 5.5$$

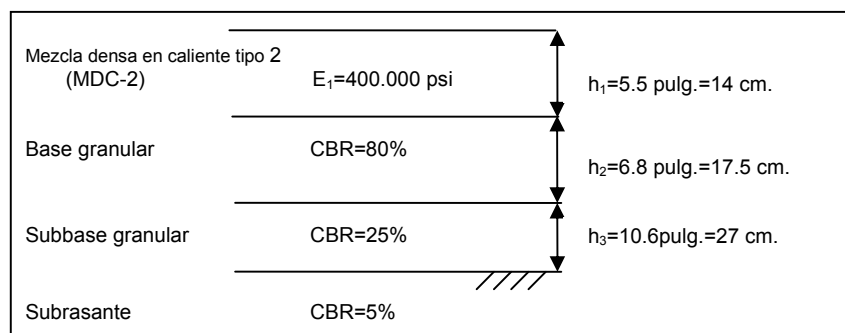
h. Con la ecuación (23) o con la figura (42) se obtiene el valor de SN_{SB} , pero ahora usando el módulo de elasticidad de la subbase $E_{SB}=13800$ psi. Y el valor que se obtiene $SN_2=3.2$ el cual corresponde al volumen estructural que aporta la base granular y el concreto asfáltico.

$$SN_{BG} = 3.2 = 5.5 * 0.42 + 0.13 * 1 * h_2 \quad \text{Entonces} \quad h_{BG} = 6.8 \text{ pulg}$$

i. Ahora con los valores obtenidos anteriormente, se calcula el espesor de la capa de subbase.

$$SN = 4.36 = 5.5 * 0.42 + 6.8 * 0.13 * 1 + h_{SB} * 0.11 * 1 \quad \text{Entonces} \quad h_{SB} = 10.6 \text{ pulg}$$

Finalmente la estructura de pavimento queda conformada de la siguiente manera.



4.2.2. Método Mecanístico

Las metodologías mecanísticas pretenden obtener la información suficiente y competente, que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones de diversos factores como el clima y el tránsito vehicular. Para el uso de este método es necesario conocer las propiedades fundamentales de los materiales, las cuales se pueden determinar en laboratorio o en campo. Esta metodología facilita la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad de los diseños.

Debido al amplio uso y evolución de la computadora, existe la tendencia a manejar los métodos de diseño, con diversas modalidades, como análisis estructural empleando sistemas de capas múltiples o mediante elementos finitos. De esta manera se utilizan, cada vez con mayor frecuencia, los modelos de simulación para el diseño de pavimentos.

Actualmente se reconoce que el CBR parece un índice demasiado sujeto a condiciones circunstanciales como para considerarlo un buen índice del comportamiento mecánico de un suelo y sin embargo, probablemente más de la mitad de los pavimentos en el mundo se siguen diseñando con este método. Los métodos basados en el equilibrio límite consisten fundamentalmente en determinar el espesor de pavimento necesario para que no se presenten fallas por sobrepasar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo; estos métodos se utilizan poco, ya que los pavimentos modernos deben diseñarse no sólo bajo un criterio de resistencia sino teniendo en cuenta la deformación permanente. En lo que respecta al uso de ecuaciones de regresión obtenidas en tramos de prueba para el diseño de pavimentos, un buen ejemplo lo constituye el Método AASHTO. Este

método es utilizado en varios países, incluyendo Colombia, pero presenta problemas en su aplicación en países con clima cálido.

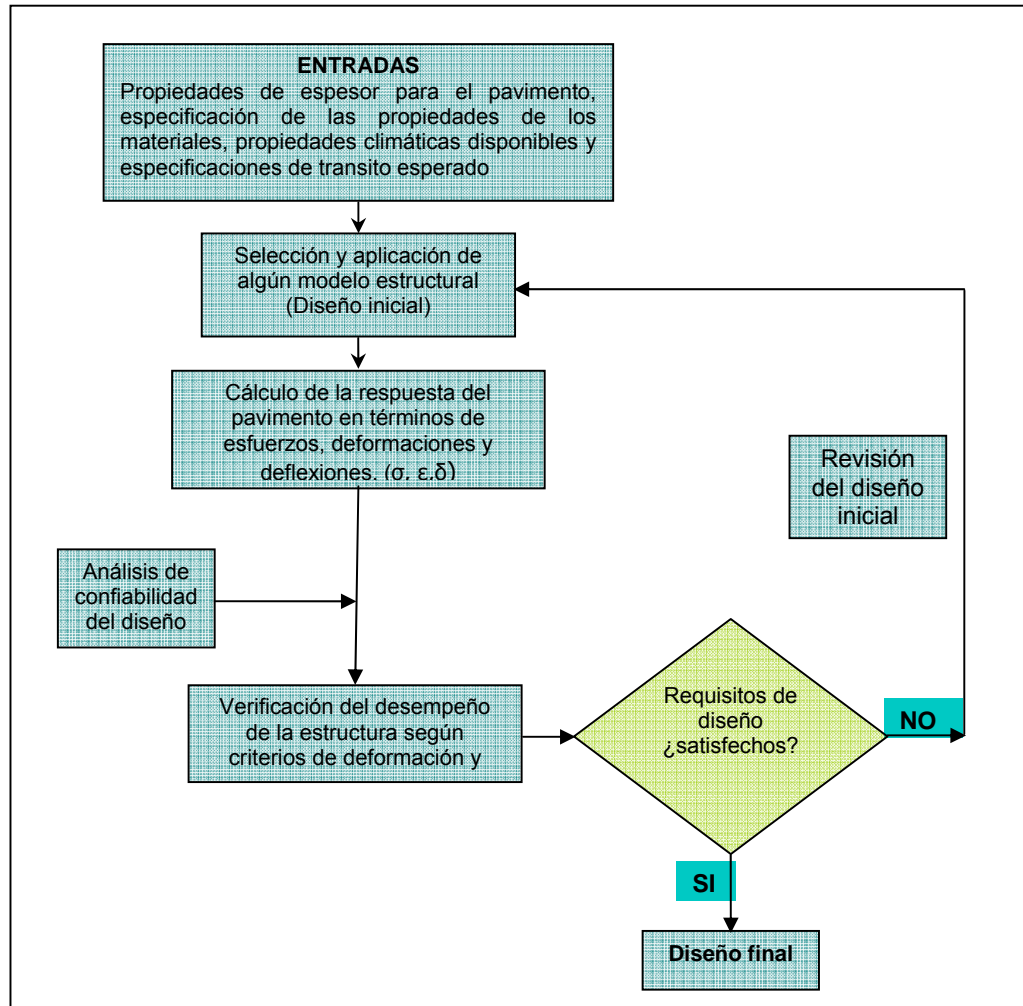
Las tendencias actuales en lo que se refiere a métodos de diseño, indican una preferencia marcada por el desarrollo de métodos "*racionales*", basados en la mecánica de los materiales que conforman el pavimento. Estos métodos se han calificado como mecanicistas, en el sentido que relacionan los niveles de la sollicitación (cargas por eje) transmitida al sistema estructural que constituye el pavimento, con la respuesta obtenida en términos de esfuerzos y deformaciones.

La respuesta así obtenida permite predecir, en principio, los niveles de deterioro esperados a partir de ensayos de laboratorio y del comportamiento observado en campo. La dependencia en el comportamiento observado del pavimento es necesaria, ya que la Teoría por sí sola ha demostrado no ser suficiente para la realización de diseños reales.

❖ **Algoritmo para dimensionamiento de pavimentos flexibles.**

La Figura (44) muestra la metodología general para el diseño de pavimentos flexibles. En dicha figura se asume que los materiales utilizados en la estructura del pavimento son conocidos a priori y que sólo sus espesores están sujetos a iteraciones de diseño. Si los espesores propuestos no satisfacen los requisitos de diseño, será entonces necesario cambiar los tipos y propiedades de los materiales a utilizar. En lo que sigue se explica brevemente cada uno de los pasos que constituyen la metodología.

Figura 44. Metodología general para el diseño de pavimentos según el método mecánico



➤ **Configuración del pavimento.**

Como primer paso para el uso de este método, se supone una configuración inicial del pavimento, que incluye el número de capas, su espesor y el tipo de materiales a utilizar. Esto se puede realizar convenientemente con base en la experiencia ya adquirida o usando información de catálogos de secciones

estructurales para pavimentos. Las especificaciones de los materiales a utilizar en cada una de las capas pueden basarse en la experiencia ya validada o dependiendo del tipo de vía y de la región donde se esta realizando la obra.

➤ **Caracterización de materiales.**

La propiedad básica de los materiales que conforman las capas de un pavimento (carpeta asfáltica, base, subbase y subrasante) es el *Módulo de Resiliencia*. Según AASHTO el Módulo de Resiliencia está llamado a sustituir al Valor Relativo de Soporte por las razones siguientes:

- ✓ Se supone que es una propiedad mecánica básica que puede usarse en análisis mecanicistas de sistemas de capas múltiples para predecir diferentes tipos de deterioros, como son el agrietamiento, las deformaciones permanentes, la rugosidad, entre otras.
- ✓ El procedimiento para su obtención de los materiales está normalizado según método AASHTO T 274,
- ✓ Se le ha reconocido internacionalmente como método para la caracterización de materiales y para su uso en diseño y evaluación de pavimentos,
- ✓ Existen técnicas no destructivas para su medición indirecta en campo. La dificultad actual que existe para la determinación y uso común del módulo de resiliencia es la necesidad de equipos triaxiales cíclicos, que no son todavía comunes en los laboratorios de pruebas. Debido a ello se han propuesto varias ecuaciones de correlación entre el Módulo de Resiliencia y otros parámetros de fácil obtención como el Valor Relativo de Soporte. Cuando un suelo se somete a carga cíclica se observa, experimentalmente, que después de la aplicación de cada ciclo de carga existe una parte de la

deformación que se recupera y otra que es permanente. La acumulación de la deformación permanente al cabo de un gran número de ciclos es una de las principales causas del deterioro de los pavimentos.

➤ ***Factores climáticos.***

El factor clima es uno de los parámetros más variables para el diseño de pavimentos, ya que la temperatura y los contenidos de agua en el pavimento se modifican considerablemente durante el año, entonces es necesario tomar en cuenta diferentes valores para los módulos de resiliencia de cada una de las capas que conforman el pavimento en función de la época. La determinación de dicha variación necesita la utilización de modelos climáticos. Estos modelos incluyen los modelos de transferencia de calor para determinar la distribución espacial y temporal de temperaturas, los modelos de equilibrio, para determinar la distribución final de humedades a nivel de la subrasante y los modelos de infiltración y drenaje para poder predecir el grado de saturación en capas granulares.

El grado de saturación en la base y en la subrasante se predice diariamente considerando la distribución de probabilidad de la cantidad de lluvia, las probabilidades de días secos y lluviosos, la infiltración de agua en el pavimento a través de grietas y juntas, el drenaje de la capa base y las probabilidades de aumento o disminución del contenido de agua en las capas del pavimento.

El módulo de la carpeta asfáltica depende de la temperatura del pavimento, mientras que los módulos de la base, subbase y subrasante varían considerablemente con los cambios en sus contenidos de agua. En suelos cohesivos, incluyendo suelos granulares con un significativo porcentaje de

finos, la resistencia y el módulo de resiliencia son muy sensibles a pequeños cambios en el contenido de agua.

➤ ***Condiciones de tránsito.***

El tránsito debe subdividirse en un cierto número de grupos, cada uno con diferentes configuraciones, pesos y número de repeticiones. El peso, la configuración, separación entre ejes, el radio y la presión de contacto son variables utilizadas en algunos de los modelos estructurales, mientras que el número de repeticiones se usa en los modelos de deterioro.

➤ ***Modelos estructurales.***

En el mercado están disponibles muchos programas que utilizan este tipo de modelos, entre los cuales mencionamos algunos como: EVERSTRESS, ALIZE III, KENLAYER (Universidad de Kentucky), CEDEM (calcula de esfuerzos y deformaciones en estructuras multicapas), KENPAV (diseño racional de pavimentos). Algunas de las Páginas Web donde se pueden encontrar los softwares para diseño de pavimentos para uso libre son:

<http://www.wsdot.wa.gov>

<http://www.camineros.com>

➤ **Respuesta del pavimento.**

La respuesta de un pavimento ante una sollicitación está dada en términos de esfuerzos, σ , deformaciones, ϵ , y deflexiones, δ y es obtenida a partir de los modelos estructurales descritos en la sección anterior o por medios matemáticos los cuales se mencionan a continuación.

En general, se acepta que los cuatro indicadores más significativos del comportamiento de un pavimento flexible son la deflexión superficial, la deformación a la tensión en la carpeta asfáltica, y los esfuerzos y deformaciones de compresión en la subrasante. La deflexión superficial y la máxima deformación a la tensión en el plano inferior de la carpeta asfáltica están directamente relacionadas con el agrietamiento del concreto asfáltico por fatiga.

Los esfuerzos y deformaciones de compresión en la subrasante se relacionan con las deformaciones permanentes en el pavimento. La eficacia del diseño estructural de un pavimento se puede evaluar comparando los esfuerzos y deformaciones calculados en puntos críticos del pavimento con los valores de diseño, obtenidos de ensayos de laboratorio en los materiales constitutivos.

Calculo de esfuerzos y deformaciones según métodos matemáticos

La forma mas sencilla de caracterizar el comportamiento de un pavimento flexible bajo la aplicación de las cargas de transito es considerarlo como un medio homogéneo, el cual tiene un área infinitamente grande y una profundidad infinita con un plano superior sobre el cual se aplican las cargas.

Como un primer análisis para determinar la distribución de esfuerzos en un pavimento se aplicó el modelo propuesto por el matemático francés Boussinesq en 1885, el cual se presenta a continuación:

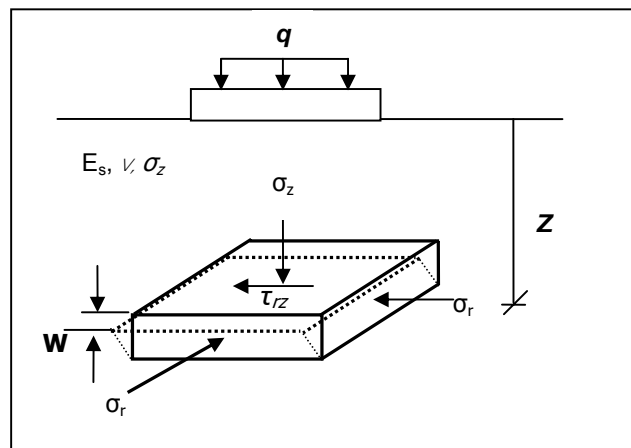
Nomenclatura para las distintas ecuaciones que se presentan a continuación para el cálculo de esfuerzos y deformaciones

- a : Radio de carga de la huella circular o semieje en la deflexión x de la carga de la huella elíptica
- b : Semieje en la dirección y de la carga de huella elíptica
- d : Separación entre el centros de semieje.
- h : Espesor de placa.
- h_i : Espesor de la capa n .
- k : Módulo de reacción del suelo
- l : Radio de rigidez de la placa
- n : Número de capas
- q : Presión de carga
- w : Desplazamiento vertical
- w_o : Desplazamiento de la superficie
- w_s : Desplazamiento del suelo
- x, y y z : Coordenadas cartesianas de un punto.
- E : Módulo de Young de la placa.
- E_i : Módulo de Young de la capa i .
- E_s : Módulo de Young de una macizo semi-infinito.
- P : Peso total de la carga.
- ln : Logaritmo natural.
- log. : Logaritmo en base 10.
- ν : Coeficiente de Poisson.
- σ_c : Esfuerzo de tracción en la esquina de la placa.
- σ_e : Esfuerzo de tracción en el borde de la placa.

- σ_r : Esfuerzo radial de tracción.
- σ_x : Esfuerzo de tracción según x en el centro de la placa.
- σ_z : Esfuerzo vertical.
- τ : Cizallamiento.

- ◆ **Modelo de Boussinesq con rueda simple:** Este modelo permite obtener el estado de esfuerzos en un macizo semi-infinito a cualquier profundidad. El estudio del matemático se basó en la aplicación de una presión uniforme q sobre un área circular de radio a . pero suponiendo que el macizo es elástico, isotrópico y homogéneo, con módulo de Young E_s y de coeficiente de poisson ν . Los esfuerzos determinados según la Ecuación de Boussinesq están dados por las siguientes ecuaciones:

Figura 45. Modelo de Boussinesq para los esfuerzos actuantes sobre elementos.



Calculo de deformaciones

Los desplazamientos dentro del macizo semi-infinito a todo punto del eje de la carga a una profundidad **Z** están dados por:

$$w = \frac{q}{E_s} \left[2(1-\nu^2)(a^2 + z^2)^{1/2} - \frac{(1+\nu)z^2}{(a^2 + z^2)^{1/2}} + (\nu + 2\nu^2 - 1)z \right] \quad \text{Ecuación (25)}$$

La deflexión en la superficie del macizo semi -infinito (z=0):

$$w_0 = 2 \frac{q}{E_s} a(1-\nu^2) \quad \text{Ecuación (26)}$$

Calculo de esfuerzo

Estos se calculan en un punto del eje de la carga localizado a una profundidad z y se obtiene usando la siguiente ecuación:

– Esfuerzo vertical

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad \text{Ecuación (27)}$$

– Esfuerzo radial

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[(1+2\nu) - \frac{2(1+\nu)z}{(a^2 + z^2)^{1/2}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad \text{Ecuación (28)}$$

– Cizallamiento máximo

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_z - \sigma_r}{2} \quad \text{Ecuación (29)}$$

Ejemplo resuelto:

Calcular deformación y esfuerzos a una profundidad de 0.4m, para un macizo semi-infinito sometido a una presión uniforme q de 0.5 MPa sobre un área circular de radio 0.15 m y cuyas características son; E=35 Mpa y coeficiente de Poisson de 0.35.

Solución

Para solucionar este problema se reemplazan cada uno de los valores en las ecuaciones que se describieron anteriormente según Boussinesq para desplazamientos, deflexiones y esfuerzos.

a. Calculo de desplazamiento.

$$w = \frac{0.5}{35} \left[2(1 - 0.35^2)(0.15^2 + 0.4^2)^{1/2} - \frac{(1 + 0.35)z^2}{(0.15^2 + 0.4^2)^{1/2}} + (0.35 + 2 * 0.35^2 - 1)0.4 \right]$$

Desplazamiento: $w = -5.47 \times 10^{-3} \text{ m} = 5.47 \text{ mm}$.

b. Calculo de deflexión

$$w_0 = 2 \frac{0.5}{35} * 0.15(1 - 0.35^2)$$

Deflexión: $w_0 = 3.76 \times 10^{-3} \text{ m} = 3.76 \text{ mm.}$

c. Calculo de esfuerzo vertical

$$\sigma_z = 0.5 \left[1 - \frac{0.4^3}{(0.15^2 + 0.4^2)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

Esfuerzo vertical: $\sigma_z = 0.91 \text{ Mpa.}$

d. calculo del esfuerzo radial

$$\sigma_r = \frac{0.5}{2} \left[(1 + 2 * 0.35) - \frac{2(1 + 0.35)0.4}{(0.15^2 + 0.4^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{0.15^3}{(0.15^2 + 0.4^2)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

Esfuerzo radial: $\sigma_r = 0.422$

e. calculo del cizallamiento máximo

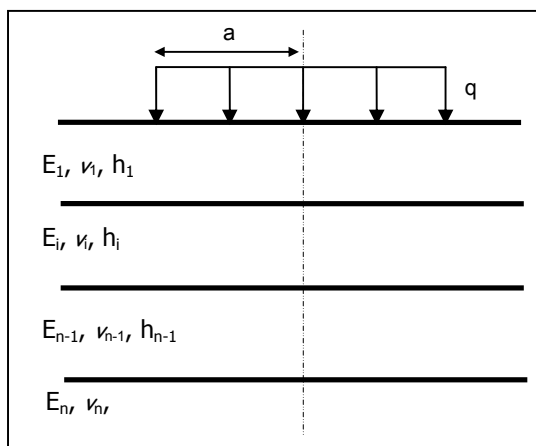
$$\tau_{\max} = \frac{0.91 - 0.422}{2}$$

Cizallamiento máximo: $\tau_{\max.} = 0.244 \text{ Mpa.}$

MODELOS MULTICAPAS

- ♦ **Fórmulas generales de Palmer y Barber:** La carga sobre la calzada es representada por una presión uniforme q , aplicada sobre un área circular de radio a . La calzada esta conformada por $n-1$ capas horizontales espesor h_i , de módulo de Young E_i y de coeficiente de Poisson ν_i ,

Figura 46. Multicapa propuesto con la formula de Palmer y Barber generalizada.



Calculo de deformaciones

La deflexión el centro de carga esta dada por:

$$w_o = \frac{2qa(1-\nu^2)}{E_s} \left[\frac{1 - \frac{E_n}{\hat{E}}}{1 + \left(\frac{h_1 + \dots + h_{n-1}}{\left(\frac{\hat{E}}{E_n} \right)^{\frac{2}{3}}} \right)^2} + \frac{E_n}{\hat{E}} \right] \quad \text{Ecuación (30)}$$

Con:

$$\hat{E} = E_1 \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} \dots h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3$$

Ejercicio resuelto

Calcular la deflexión de la estructura de pavimento sometida a una pasión uniforme de 0.5 MPa sobre su calzada, en un área circular de radio $a = 0.15$ m. La estructura es multicapa y sus características son: el módulo de Poisson es igual para todas las capas $\nu=0.35$

$$h_1 = 0.06 \text{ m} \quad E_1 = 8000 \text{ Mpa.}$$

$$h_2 = 0.15 \quad E_2 = 120 \text{ Mpa.}$$

$$h_3 = 0.18 \quad E_3 = 60 \text{ Mpa.}$$

$$h_4 = \infty \quad E_4 = 30 \text{ Mpa.}$$

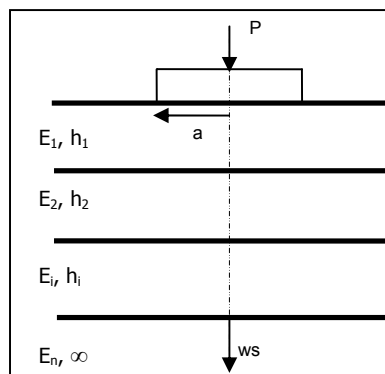
Solución

$$\hat{E} = 8000 \left[\frac{0.06 + 0.15 \sqrt[3]{\frac{120}{8000}} + 0.18 \sqrt[3]{\frac{60}{8000}}}{0.06 + 0.15 + 0.18} \right]^3 = 311.78 MPa.$$

$$w_o = \frac{2 * 0.5 * 0.15 (1 - 0.35^2)}{30} \left[\frac{1 - \frac{30}{311.78}}{\left[1 + \left(\frac{0.06 + 0.15 + 0.18}{0.15} \right)^2 \left(\frac{311.78}{30} \right)^{\frac{2}{3}} \right]} + \frac{30}{311.78} \right] = 7.73 \times 10^{-4} m = 0.77 mm.$$

- ◆ **Fórmula de Ondemark:** la carga sobre la calzada se representa por una presión uniforme q, aplicada sobre un área circular de radio a. La calzada esta compuesta por n-1 capas horizontales, de espesor h_i, módulo de Young E_i y de coeficiente de Poisson ν_i, todos igual a ν, que se ubica sobre una capa semi-infinita de características mecánicas E_n y ν.

Figura 47. Multicapa propuesto con al formula de Odemark.



Calculo de deflexiones

El desplazamiento vertical a nivel de suelo soporte y en el eje de la carga esta dado por:

$$w_s = \frac{P}{2E_n h_e \sqrt{1 + \frac{a}{h_e}}} \quad \text{Ecuación (31)}$$

Donde:

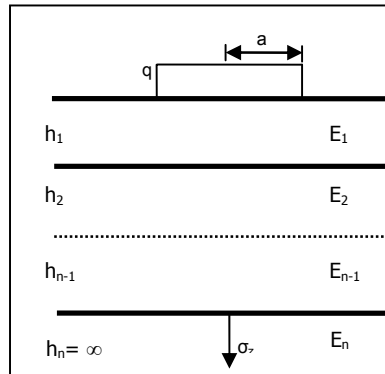
$$P = \pi \cdot a^2 \cdot q$$

$$h_e = 0.8 \sum_{i=1}^{n-1} h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}}$$

Calculo de esfuerzos

Esfuerzo según la formula de Odemark y Kirk: En un modelo elástico de n capas de espesor h_i , con un módulo de Young E_i , el cual esta sometido a una carga circular, el esfuerzo vertical σ_z se calcula así:

Figura 48. Esfuerzo vertical en un multicapa con las formulas de Odemark y Kira



$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{a}{h_e} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right]$$

Ecuación (32)

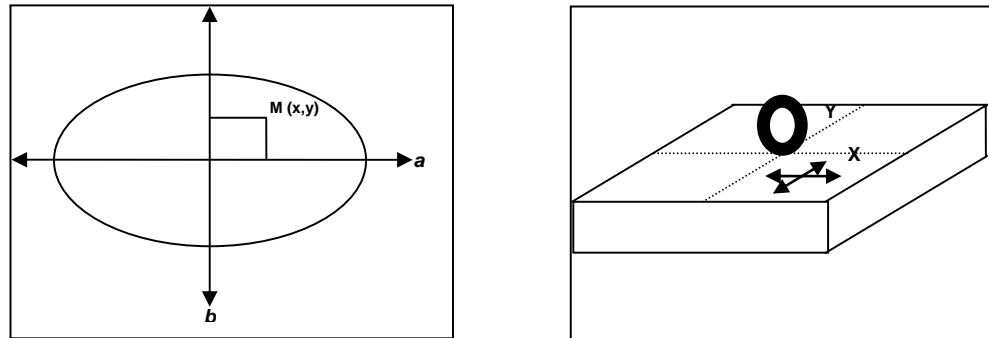
Donde:

$$h_e = 0.8 \sum_{i=1}^{n-1} h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}}$$

- ◆ **Formulas de Westergaard:** La carga P esta aplicada sobre un área elíptica de semiejes a y b, donde a esta siempre paralelo al lado de la placa si la cara es próxima a ella. La calzada e un medio homogéneo, isotrópico y elástico de módulo de Young E y e coeficiente de Poisson ν y su espeso h es constante. además el suelo en contando con la losa se caracteriza por su módulo de reacción K.

– Carga en el interior de la placa.

Figura 49. Carga en el interior de la placa.



Calculo de deformaciones

La deflexión en un punto M el cual tiene coordenadas (x,y) bajo la carga o en su proximidad esta dado por:

$$w_o = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 - \left(\frac{a^2 + b^2 + 4x^2 + 4y^2}{16\pi^2} \right) \ln \left[\frac{Eh^3}{k \left(\frac{a+b}{2} \right)^4} \right] - \left[\frac{a^2 + 4ab + b^2}{16\pi^2} \right] + \left[\frac{(a-b)(x^2 - y^2)}{2\pi^2(a+b)} \right] \right\} \text{ Ecuación (33)}$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}}$$

Donde:

- k : Módulo de reacción
- w_o : Es la deflexión
- P : Peso total de la carga.

Calculo de esfuerzos

A continuación se presenta las ecuaciones con las cuales se pueden obtener los valores de los esfuerzos σ_x y σ_y en la base de la placa en las direcciones x y y ; y en el eje de la carga.

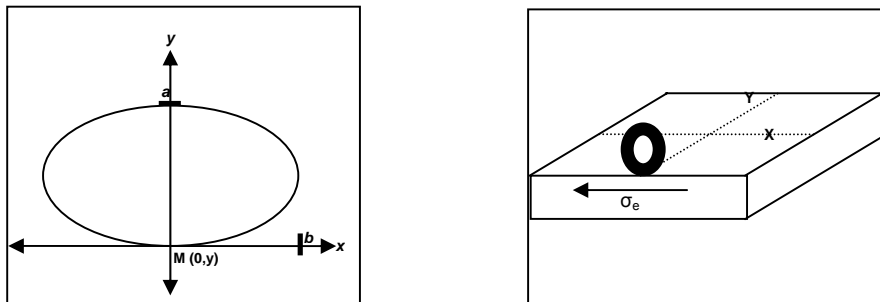
$$\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{3P}{8\pi h^2} \left[(1+\nu) \ln \left[\frac{Eh^3}{k \left(\frac{a+b}{2} \right)^4} \right] \mp 2(1+\nu) \left(\frac{a-b}{a+b} \right) \right] \quad \text{Ecuación (34)}$$

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{P}{h^2} \left[0.275(1+\nu) \log \left[\frac{Eh^3}{k \left(\frac{a+b}{2} \right)^4} \right] \mp 0.239(1-\nu) \left(\frac{a-b}{a+b} \right) \right] \quad \text{Ecuación (35)}$$

– Carga situado a lo largo de un borde de la losa o de una junta

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{(y-b)^2}{b^2} = 1$$

Figura 50. Carga en el borde de la junta.



Calculo de deformaciones

La deflexión en un punto M, el cual tiene como coordenadas (0,y), se encuentra situado en el eje de simetría perpendicular al borde, se puede calcular como se muestra a continuación:

$$w_o = \frac{P\sqrt{2+1.2\nu}}{Eh^3k} \left\{ \left[1 - (0.76 + 0.4\nu)\frac{b}{l} \right] \left[1 - (0.76 + 0.4\nu)\frac{y}{l} \right] \right\} \quad \text{Ecuación (36)}$$

Calculo de esfuerzos

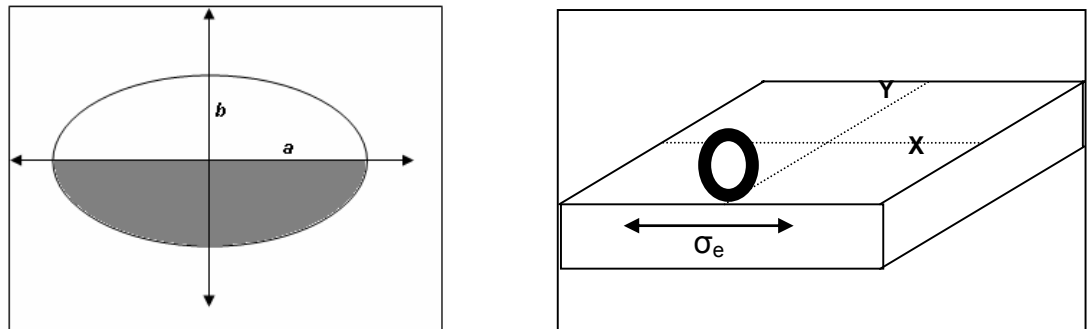
El esfuerzo máximo σ_e en la base de la placa a lo largo de la junta, se calcula como se muestra a continuación:

$$\sigma_e = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln \left[\frac{Eh^3}{100k \left(\frac{a+b}{2} \right)^4} \right] + 1.84 - \frac{4}{3}\nu + (1+\nu)\frac{ab}{(a+b)^2} + 1.18(1-\nu)\frac{b}{l} \right\} \quad \text{Ecuación (37)}$$

$$\sigma_e = \frac{2.2(1+\nu)P}{(3+\nu)h^2} \log \left[\frac{Eh^3}{100k \left(\frac{a+b}{2} \right)^4} \right] + \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[1.84 - \frac{4}{3}\nu + (1+\nu)\frac{(a-b)}{(a+b)} + 2(1-\nu)\frac{ab}{(a+b)^2} + 1.18(1+2\nu)\frac{b}{l} \right]$$

- *Carga repartida sobre dos cargas sin transferencia de carga: Para este caso en particular el borde no transmite carga, pero la carga esta repartida en dos semielipses.*

Figura 51. Carga repartida en dos cargas sin transferencia de carga



Calculo de deformaciones

La deflexión en un punto M de coordenada (0,y), el cual se encuentra ubicado sobre el eje de simetría perpendicular al borde se calcula así:

$$w_o = \frac{P\sqrt{2+1.2\nu}}{Eh^3k} \left\{ \left[1 - (0.323 + 0.17\nu)\frac{b}{l} \right] \left[1 - (0.76 + 0.4\nu)\frac{y}{l} \right] \right\} \quad \text{Ecuación (38)}$$

Calculo de esfuerzos

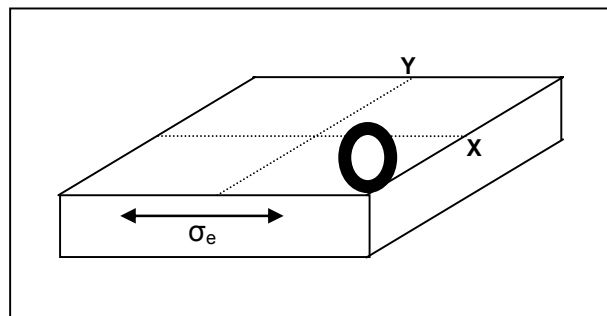
El esfuerzo máximo σ_e en la base de la placa y a lo largo de la junta se calcula de la siguiente forma:

$$\sigma_e = \frac{2.2(1+\nu)\frac{P}{2}}{(3+\nu)h^2} \log \left[\frac{Eh^3}{100k\left(\frac{a+b}{2}\right)^4} \right] + \frac{3(1+\nu)\frac{P}{2}}{\pi(3+\nu)h^2} \left[3.84 - \frac{4}{3}\nu + (1-\nu)\frac{(a-b)}{(a+b)} + 0.5(1+2\nu)\frac{b}{l} \right]$$

Ecuación (39)

- Si la carga se encuentra en la esquina de la placa

Figura 52. Carga en la esquina de la placa.



$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left\{ 1 - \left[\frac{12(1-\nu^2)k}{Eh^3} \right]^{0.3} \left(\frac{a+b}{2} \sqrt{2} \right)^{1.2} \right\}$$

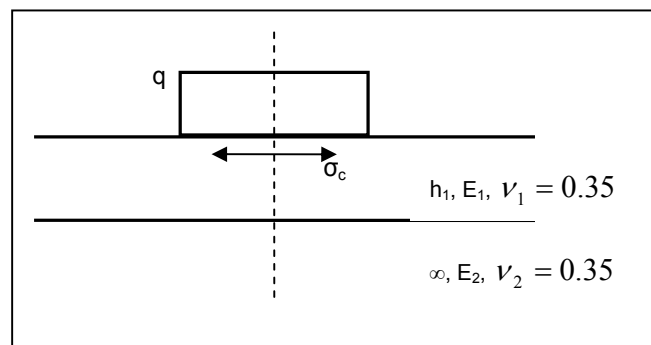
Ecuación (40)

Otros métodos para calcular los esfuerzos

- ♦ **Formula de Lister y Jones:** Dependiendo de los estudios ya realizados a los modelos bicapas elásticas, estos autores proponen, la siguiente formula,

la cual permite calcular el esfuerzo máximo de tracción σ_c en la base de una capa sometida a la acción de una carga circular uniformemente repartida.

Figura 53. Esfuerzo horizontales en un modelo bicapa con las fórmulas de Lister y Jones



$$\sigma_c = 1,8q \left(\frac{a}{h} \right)^{1.85} \log \frac{E_1}{E_2} \quad \text{Ecuación (41)}$$

Donde:

$$0.1 < \frac{a}{h} < 0.7 \quad \text{y} \quad 2 < \frac{E_1}{E_2} < 1000$$

➤ **Análisis de confiabilidad.**

Los métodos de diseño de pavimentos pueden ser de tipo determinístico o probabilístico. En el tipo determinístico, cada factor o variable que interviene en

el diseño tiene un valor fijo determinado, con un factor de seguridad asignado. Para zonas donde la incertidumbre sea alta, es recomendable asignar factores de seguridad altos, pero toca tener mucho cuidado ya que al hacer esto se puede producir un sobrediseño o un subdiseño, dependiendo de las magnitudes de los factores de seguridad aplicados y de la sensibilidad de los procedimientos de diseño.

Un procedimiento alternativo es el método probabilístico en donde a cada factor o variable de diseño se le asigna un valor medio y una variancia. De esta manera, el factor de seguridad que se aplica a cada una de las variables, así como su influencia en el diseño final, son automáticamente tomados en consideración y entonces se puede evaluar la confiabilidad del diseño. La confiabilidad se define entonces como la probabilidad de que el diseño propuesto cumpla con las funciones especificadas en el proyecto durante el período de diseño considerado.

➤ **Modelos de deterioro.**

Se hace el análisis de la información que arroja el programa teniendo en cuenta los criterios de falla de debido a fatiga y a deformación permanente, y si la confiabilidad para un cierto deterioro es menor que el nivel mínimo requerido, la configuración del pavimento deberá modificarse y comenzar una nueva iteración, hasta la obtención del nivel adecuado.

- ✓ **Modelos de Fracturamiento por Fatiga.** El concepto de daño acumulado, propuesto por Miner en 1945, se utiliza para predecir el fracturamiento por fatiga. Según este concepto, el número permisible de repeticiones de carga está relacionado con el valor de la deformación por tensión en la parte

inferior de la capa asfáltica. La cantidad de daño se mide por medio de lo que se denomina relación de daño, que es la relación entre los números de repeticiones esperadas y las permisibles.

Teóricamente, cuando esta relación es igual a 1, el daño se produce. Por supuesto, dadas las incertidumbres involucradas, todo el daño no se produce una vez que se alcanza ese valor de 1. Si se utilizan en el diseño los valores medios de cada parámetro, una relación de daño igual a 1 indica que la probabilidad de falla es de 50%; es decir, el 50% del área presentará fracturamiento por fatiga. La diferencia principal entre los métodos de diseño es la forma de la función de transferencia que relaciona las deformaciones de tensión, ε_t , en la fibra inferior de la carpeta asfáltica, cuyo módulo de elasticidad es E_1 , con el número de repeticiones admisibles N_f . Por ejemplo, los métodos de diseño de la Compañía Shell y del Instituto del Asfalto usan la expresión

$$N_f = f_1 * \varepsilon_t^{-f_2} * E_1^{-f_3} \quad \text{Ecuación (42)}$$

Donde:

f_1 , f_2 y f_3 son constantes que se determinan a partir de ensayos de fatiga llevados a cabo en el laboratorio y f_1 debe posteriormente modificarse para correlacionarlo con el comportamiento observado en el campo.

Para una mezcla asfáltica estándar de diseño, la ecuación del Instituto del Asfalto para limitar a 20% el área afectada por el fracturamiento es:

$$N_f = 0.0796 * \varepsilon_t^{-3.291} * E_1^{-0.854} \quad \text{Ecuación (43)}$$

En tanto que la de la Compañía Shell es:

$$\varepsilon_t = (0.856V_b + 1.08) * E_1^{0.36} N_{f1}^{-0.2} \quad \text{Ecuación (44)}$$

Donde:

ε_t : Deformación en la parte inferior de la capa asfáltica

V_b : Volumen de asfalto

E_1 : Rigidez del concreto asfáltico en (N/m²)

N_{f1} : Número de aplicaciones de carga (de laboratorio)

- ✓ **Modelos de Deformación permanente:** Este procedimiento de control consiste en limitar únicamente la deformación vertical de compresión en la fibra superior de la capa subrasante.

En los métodos de diseño del Instituto del Asfalto y de la Compañía Shell, el número de repeticiones admisibles N_d para limitar las deformaciones permanentes, se relaciona con la deformación vertical de compresión ε_z en la fibra superior de la subrasante, con una ecuación del tipo

$$N_d = f_4 * \varepsilon_z^{-f_5} \quad \text{Ecuación (45)}$$

Donde:

f_4 y f_5 son constantes que se determinan a partir de ensayos de laboratorio, de tramos de prueba o del comportamiento observado en el campo. En la Tabla (51) se muestran los valores típicos de f_4 y f_5 utilizados por diversas instituciones.

Tabla 51. Criterios de deformación utilizados por diversas Instituciones.

INSTITUCIÓN	f_4	f_5	Profundidad de deformación máxima. (mm)
Compañía Shell			
50% de confiabilidad	$6.15 \cdot 10^{-7}$	4.00	
85% de confiabilidad	$1.94 \cdot 10^{-7}$	4.00	
95% de confiabilidad	$1.05 \cdot 10^{-7}$	4.00	
Instituto del Asfalto	$1.365 \cdot 10^{-9}$	4.477	12.7
TRRL, U.K.			
85% de confiabilidad	$6.18 \cdot 10^{-8}$	3.97	10.16
BRRC, Bélgica	$3.05 \cdot 10^{-9}$	4.35	

➤ **Diseño final.**

El diseño final se obtiene cuando la configuración del pavimento, es decir la geometría y las propiedades de los materiales, satisfacen los requisitos de confiabilidad para cada tipo de falla, tanto de fatiga como de deformación permanente.

Ejemplo resuelto

Diseñar un pavimento que soporte 15 millones de ejes equivalentes en un periodo de diseño de 20 años, con una confiabilidad del 85%. El eje equivalente tiene una presión de inflado de las llantas de 80 psi, radio de carga de 10,8 cm. y la distancia entre los centros del par de llantas es de 32.4 cm. El módulo resiliente de la subrasante es de 300 kg./cm^2 , el volumen de asfalto en

porcentaje es de $V_b = 10\%$ y la rigidez del concreto asfáltico es $S_m = 2.7 \times 10^9$ N/m².

Solución

a. Inicialmente se suponen los espesores de las capas y con base en el módulo resiliente de la subrasante se estima un valor de rigidez en las demás capas no tratadas, entonces:

b.

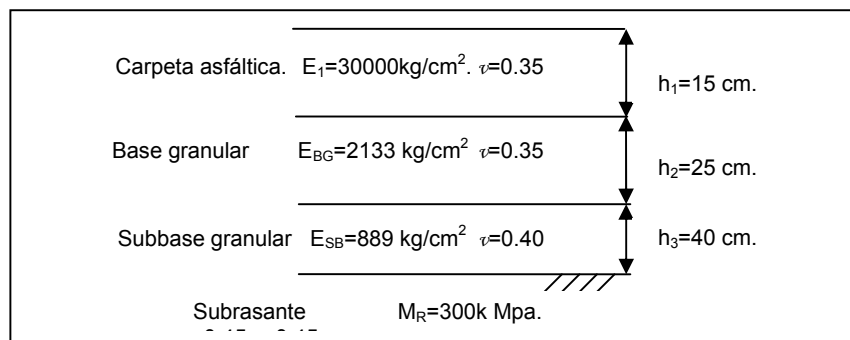
Se supone un espesor de la subbase granular de 40 cm y se calcula su módulo elástico.

$$E_{SB} = 0.2 \cdot (400 \text{ mm.})^{0.45} \cdot (300 \text{ kg./cm}^2)$$

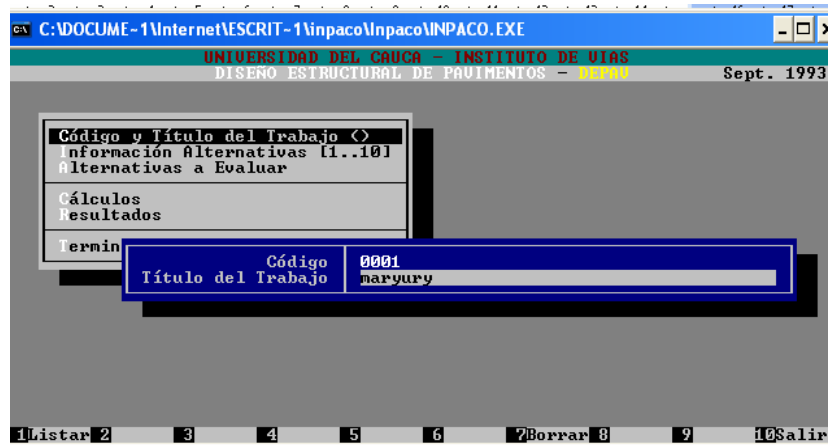
$$E_{SB} = 889 \text{ Kg./cm}^2$$

Siguiendo la misma metodología, se calcula el módulo elástico de la base.

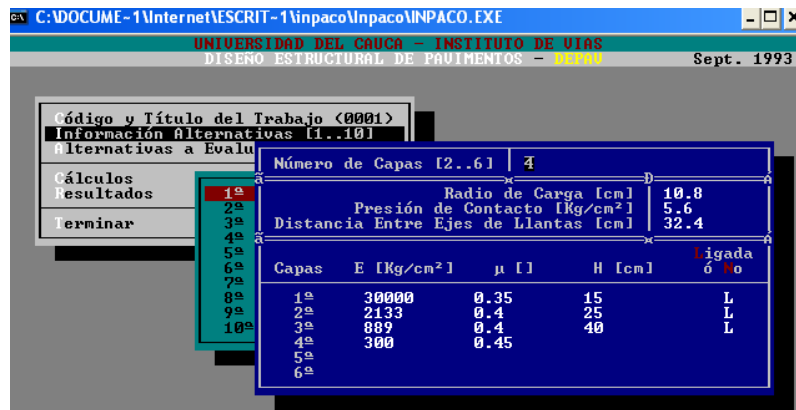
Después de calcular los módulos elásticos la estructura queda como se muestra a continuación, lista para analizarla con el software. (Para este caso se analizó con INPACO, que es un software creado por el ministerio de obras públicas y transportes y sirve para realizar análisis de tránsito, IRI, coeficiente APL, deflexión Benkelman, cálculo de esfuerzos y deformación en pavimentos flexibles.)



- c. Al abrir el programa aparece una ventana denominada Datos la cual solicita la siguiente información: el nombre del proyecto, “ maryury”



- d. Ahora se abre la otra ventana la cual solicita toda la información de la estructura. (número de capas, módulos elásticos, coeficientes de Poisson, espesores, radio de carga, presión de contacto, distancia entre ejes de llantas y la información de si las capas son ligadas o no).



- e. Después de tener toda la información registrada se le oprime la opción calcular y el programa arroja una nueva ventana con toda la información de esfuerzos y deformaciones de la estructura.

C:\DOCUME-1\Internet\ESCRIT-1\inpaco\inpaco\INPACO.EXE

UNIVERSIDAD DEL CAUCA – INSTITUTO DE VIAS
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS – **02700** Sept. 1993

Título del Trabajo : **maryury** Alternativa : **1**
Número de Capas : **4**

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1ª	0.00 15.00	2.0700E-04 C -1.9600E-04 B	1.1727E+01 B -7.7293E+00 B	-1.4700E-04 C 1.9600E-04 B	5.5982E+00 A 9.7279E-01 B
2ª	15.00 40.00	-1.9600E-04 B -1.9200E-04 C	1.8559E-02 B -4.3643E-01 C	4.3100E-04 B 3.0000E-04 C	9.7279E-01 B 3.1203E-01 C
3ª	40.00 80.00	-1.9200E-04 C -1.4900E-04 C	-6.0774E-02 C -1.5296E-01 C	3.9500E-04 C 2.4400E-04 C	3.1203E-01 C 9.7301E-02 C

Deflexión = **64.570 mm/100**
Radio de Curvatura = **270.130 m**

1 Ayuda 2 3 Inform 4 Posic 5 6 Estruct 7 8 Imprim 9 10 Salir

C:\DOCUME-1\Internet\ESCRIT-1\inpaco\inpaco\INPACO.EXE

UNIVERSIDAD DEL CAUCA – INSTITUTO DE VIAS
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS – **02700** Sept. 1993

Título del Trabajo : **maryury** Alternativa : **1**
Número de Capas : **4**

Capa N°	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
4ª	80.00	-1.4900E-04 C	-2.6614E-04 C	3.2300E-04 C	9.7381E-02 C
5ª					
6ª					

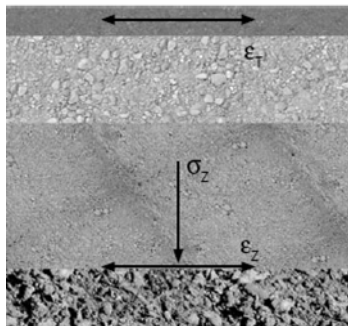
Deflexión = **64.570 mm/100**
Radio de Curvatura = **270.130 m**

1 Ayuda 2 3 Inform 4 Posic 5 6 Estruct 7 8 Imprim 9 10 Salir

- f. De acuerdo con los análisis que se le deben realizar a las capas tanto de fatiga como de deformación. se selecciona el ϵ_t y ϵ_z .

$$\epsilon_t = -1.96 \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_z = 3.23 \times 10^{-4}$$



- g. Después de calcular los esfuerzos se procede a realizar el análisis por fatiga y deformación permanente, empleando las ecuaciones de Shell.

Análisis por fatiga:

$$\varepsilon_t = (0.856V_b + 1,08) * S_m^{-0.36} * (N/f_c)^{-0.2}$$

f_c es un factor de ajuste porque la ecuación anterior fue obtenida en ensayos de fatiga en laboratorio.

Según Shell f_c puede variar entre 10 y 20, (10 en mezclas abiertas, 20 en mezclas densas y ricas en asfalto), si se adopta un valor de 10.

$$\varepsilon_t = (0.856*10+1.08)*(2.7*10^9)^{-0.36}*(15*10^6/10)^{-0.2} = 2.8 \times 10^{-4}$$

Análisis de deformación permanente:

$$N = 1.94 \times 10^{-7} * (\varepsilon_z)^{-4}$$

$$\varepsilon_z = 4.49 \times 10^{-4}$$

Respuesta: como las deformaciones estimadas por el programa son menores que las admisibles calculadas por las ecuaciones de Shell, entonces es evidente que la estructura esta sobrediseñada y seria necesario reajustar los valores, por medio de nuevas iteraciones.

5. DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

5.1. MÉTODO EMPÍRICO

Un enfoque empírico es aquel que se basa en los resultados de los experimentos o de la experiencia. En general, se requiere una serie de observaciones a fin de determinar las relaciones entre las variables de entrada y los resultados. No es necesario establecer firmemente la base científica de las relaciones entre las variables y los resultados siempre que las limitaciones de este planteamiento son reconocidos. En concreto, no es prudente utilizar empíricamente relaciones para describir los fenómenos que ocurren fuera de los datos originales utilizados para desarrollar la relación. En algunos casos, es mucho más oportuno confiar en la experiencia que tratar de cuantificar con exactitud la causa y el efecto de ciertos fenómenos.

Muchos diseños de pavimento se realizan utilizando los procedimientos de criterio empírico. Esto significa que la relación entre algunos factores como (por ejemplo, cargas, materiales, medio ambiente y capa de configuraciones) y pavimento se llegó a cabo a través de la experiencia, la experimentación o una combinación de ambos. Los métodos Empíricos de diseño pueden variar desde muy simples a muy complejos. El diseño mas simple de pavimentos es aquel que esta basado en lo que ha funcionado en el pasado. Enfoques más complejos suelen desarrollar ecuaciones empíricas basadas en los resultados de la experimentación. Por ejemplo, las ecuaciones empíricas utilizadas en la guía AASHTO 1993 son en gran medida resultados de la guía original AASHTO Road Test.

5.1.1. Método AASHTO 1993

Un pavimento de hormigón o pavimento rígido consiste básicamente en losas de hormigón simple o armado, apoyadas directamente sobre una base o subbase, el cual puede ser dimensionado utilizando diferentes tipos de ecuaciones empíricas de las cuales se dispone actualmente, pero uno de los métodos más conocidos es el de la guía AASHTO 1993.

En este método intervienen una serie de variables las cuales constituyen la base del diseño del pavimento por lo que es importante conocer las consideraciones más importantes que tienen que ver con cada una de ellas para así poder realizar diseños confiables y óptimos al mismo tiempo.

➤ Variables de diseño de Pavimentos Rígidos

- ◆ **Espesor.** El espesor del pavimento de concreto es la variable que pretendemos determinar al realizar un diseño, el resultado del espesor se ve afectado por todas las demás variables que intervienen en los cálculos.

Es importante especificar lo que se diseña, ya que a partir de espesores regulares una pequeña variación en el espesor puede significar una variación importante en la vida útil de la estructura de pavimento.

- ◆ **Serviciabilidad.** El procedimiento de Diseño AASHTO predice el porcentaje de pérdida de serviciabilidad (Δ PSI) para varios niveles de tráfico

y cargas de ejes. Entre mayor sea el ΔPSI , mayor será la capacidad de carga del pavimento antes de fallar.

La Serviciabilidad Inicial (P_o). Es la condición que tiene un pavimento inmediatamente después de la construcción del mismo. Los valores recomendados por AASHTO para pavimentos rígidos es 4.5. Usando buenas técnicas de construcción, el pavimento de concreto puede tener una serviciabilidad $P_o = 4.7$ ó 4.8 . y los valores recomendados de Serviciabilidad Final P_t , son: para Autopistas 2.5, para Carreteras 2.0

- ◆ **Tráfico.** El Tráfico es una de las variables más significativas del diseño de pavimentos y sin embargo es una de las que más incertidumbre presenta al momento de estimarse. Es importante hacer notar que debemos contar con la información más precisa posible del tráfico para el diseño, ya que de no ser así podríamos tener diseños inseguros o con un grado importante de sobre diseño.

El método AASHTO utiliza en su formulación el número de repeticiones esperadas de carga de Ejes Equivalentes, es decir, que antes de entrar a las fórmulas de diseño, debemos transformar los Ejes de Pesos Normales de los vehículos que circularán por el camino, en Ejes Sencillos Equivalentes de (8.2 Ton).

Los pavimentos de concreto la AASHTO los diseña por fatiga. La fatiga la podemos entender como el número de repeticiones ó ciclos de carga y descarga que actúan sobre un elemento. En realidad al establecer una vida útil de diseño, lo que se esta haciendo es tratar de estimar, en un período de tiempo, el número de repeticiones de carga a las que estará sometido el pavimento.

Para el dimensionamiento de un pavimentos se debe contemplar el crecimiento del tráfico durante su vida útil, que depende en gran medida del desarrollo económico-social de la zona en cuestión, del mejoramiento de las características del pavimento se puede generar tráfico atraído e igualmente se debe considerar la capacidad de tráfico de la vía.

$$Tvu = Tpa * FCT \quad \text{Ecuación (46)}$$

Donde:

Tvu : Tráfico en la vida útil

Tpa : Tráfico durante el primer año

FCT : Factor de crecimiento del tráfico, que depende de la Tasa de Crecimiento Anual y de la Vida Útil

- ✓ *Tasa de Crecimiento Anual:* Dependiendo de muchos factores, tales como el desarrollo económico-social, la capacidad de la vía, entre otros. Es normal que el tráfico vehicular vaya aumentando con el paso del tiempo, hasta que llega a un punto tal de saturación en el que el tráfico se mantiene prácticamente sin crecer.

Es conveniente prever este crecimiento del tráfico, tomando en consideración una tasa de crecimiento anual con la que se calcula un factor de crecimiento del tráfico. La tasa de crecimiento pudiera variar de acuerdo a los tipos de vehículos, ya que pueden crecer más unos tipos que otros.

A medida que un camino se va congestionando de tráfico su crecimiento se va haciendo mas lento, este efecto debemos considerarlo pudiendo estimar una Tasa de Crecimiento Equivalente, para considerar las variaciones en el crecimiento durante la vida útil. Es importante

investigar adecuadamente la tasa de crecimiento apropiada para el caso en particular que se este considerando.

- ✓ *Factor de Crecimiento del Tráfico.* El factor de crecimiento del tráfico considera los años de vida útil más un número de años adicionales debidos al crecimiento propio de la vida Útil.

$$FCT = \frac{(1 + g)^n - 1}{g} \quad \text{Ecuación (47)}$$

Donde:

g :Tasa de Crecimiento

n :Años de Vida Útil

- ✓ *Factor de Sentido.* Del total del tráfico que se estima para el diseño del pavimento deberá determinarse el correspondiente a cada sentido de circulación, esto se realiza mediante la introducción del Factor de Sentido, cuyos valores recomendados son: Un sentido de Circulación 1.0 y Doble sentido de Circulación 2.0
- ✓ *Factor de Carril.* El factor de Carril es un coeficiente que nos permite estimar que tanto del tráfico en el sentido de diseño circula por el carril de diseño. En una vía de un solo carril en el sentido de circulación de diseño, obviamente el 100% del tráfico circulará por ese carril que al mismo tiempo será nuestro carril de diseño. Una vía con dos carriles en el sentido de diseño, dependiendo del tipo de camino: rural ó urbano, y de que tan saturada esté la vía, pueda ser que sobre el carril de diseño circule entre un 50% a un 80% del tráfico en ese sentido. El AASHTO recomienda algunos valores, sin embargo no necesariamente deben utilizarse.

Tabla 52. Factor carril

Número de carriles	Factor carril
1	1.00
2	0.8 - 1.00
3	0.6 - 0.8
4	0.5 - 0.75

- ♦ **Transferencia de Carga:** La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir fuerzas cortantes con sus losas adyacentes, con el objeto de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura de pavimento, mientras mejor sea la transferencia de cargas mejor será el comportamiento de las losas del pavimento.

El método AASHTO considera la transferencia de cargas mediante el factor de transferencia de cargas J. La efectividad de la Transferencia de Carga entre losas adyacentes depende de varios factores como son: Cantidad de Tráfico, Utilización de Pasajuntas y Soporte Lateral de las Losas.

Tabla 53. Valor de transferencia de carga “J”

Tipo de berma	Características	Transferencia de carga “J”
Bermas en asfalto	Con dovelas	3.2
	Sin dovelas	3.8 – 4.4

Tipo de berma	Características	Transferencia de carga “J”
Bermas en concreto	Con dovelas	2.5 - 3.1
	Sin dovelas	3.6 - 4.2

La utilización de pasajuntas es la manera más conveniente de lograr la efectividad en la transferencia de cargas, los investigadores recomiendan evaluar dos criterios para determinar la conveniencia de utilizar pasajuntas, es conveniente utilizar pasajuntas cuando: El tráfico pesado sea mayor al 25% del tráfico total o cuando el número de Ejes Equivalentes de diseño sea mayor de 5.0 millones.

- ◆ **Propiedades del Concreto.** existen dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño de un pavimento de concreto y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:
 - ✓ Resistencia a la tensión por flexión ($S'c$) ó Módulo de Ruptura (MR): Debido a que los pavimentos de concreto trabajan principalmente a flexión es recomendable que su especificación de resistencia sea acorde con ello, por eso el diseño considera la resistencia del concreto trabajando a flexión, que se le conoce como resistencia a la flexión por tensión ($S'c$) o Módulo de Ruptura (MR) normalmente especificada a los 28 días.
 - ✓ Módulo de Elasticidad del Concreto (E_C): El Módulo de Elasticidad del concreto esta íntimamente relacionado con su Módulo de Ruptura y se determina mediante la norma ASTM C469. Existen varios criterios con los que se puede estimar el Módulo de Elasticidad, Los más utilizados son:

$$E_c = 6.750 * M_R \quad \text{Ecuación (48)}$$

$$E_c = 26.454 * M_R^{0.77} \quad \text{Ecuación (49)}$$

$$E_c = 57000 \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación (50)}$$

Donde:

E_c : módulo de elasticidad del concreto en (Psi)

$f'c$: resistencia a la compresión del concreto a los 28 días (Psi)

M_R : módulo de ruptura del concreto (Psi)

Tabla 54. Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad E_c

Tipos de agregados y origen	Módulo de elasticidad E_c . Mpa
Grueso – ígneo	$E_c = 5,500 * (f'c)^{1/2}$
Grueso – metamórfico	$E_c = 4,700 * (f'c)^{1/2}$
Grueso – sedimentario	$E_c = 3,600 * (f'c)^{1/2}$
Sin información	$E_c = 3,900 * (f'c)^{1/2}$

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1993.

- ◆ **Factor de pérdida de soporte (Ls).** Este valor representa la posible pérdida de soporte que le puede ocurrir a la losas de pavimento debido a posibles efectos de erosión en la subbase por corriente de agua o por asentamientos diferenciales de la subrasante.

Este valor no aparece directamente en la formula de dimensionamiento de AASHTO, pero si esta en forma indirecta a través de la reducción del módulo de la reacción efectivo de la superficie (subrasante) en que se apoyan las losas. a continuación se presentan diversos valore de Ls, para distintos tipo de subbases y bases.

Tabla 55. Valores del factor de perdida de soporte Ls, por el tipo de subbase o base

Tipos de subbase o base	Factor de perdida de soporte
Subbase granular tratada con cemento (Mr: de 7000 a 14000 Mpa.)	0.00 - 1.00
Subbases tratadas con cemento (Mr: de 3500 a 7000 Mpa)	0.00 - 1.00
Bases asfálticas (Mr: de 2500 a 7000 Mpa)	0.00 - 1.00
Subbases estabilizadas con asfaltos (Mr: de 300 a 2000)	0.00 - 1.00
Estabilización con cal (Mr: de 150 a 1000 Mpa)	1.00 – 3.00
Materiales granulares sin tratar (Mr: de 100 a 300 Mpa)	1.00 – 3.00
Suelos finos y subrasantes naturales (Mr: de 20 a 300 Mpa)	2.00 – 3.00

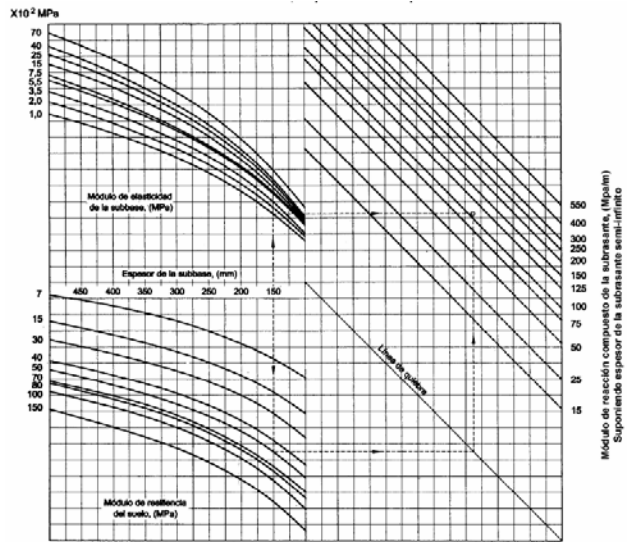
Fuente. Guía para diseño de estructura de pavimentos; AASHTO, 1993.

- ◆ **Módulo de reacción K .** El módulo de reacción de la superficie en que se apoya el pavimento de concreto o Módulo efectivo de la subrasante, es el valor de la capacidad soporte del suelo, la cual depende del módulo de resiliencia de la subrasante y subbase, así como del módulo de elasticidad de la subbase.

Debido a que el módulo de resiliencia de la subrasante, cambia a lo largo del año debido a ciclos de enfriamiento y calentamiento, por esta razón para obtener el valor efectivo del módulo de reacción de la subrasante, es necesario calcularlo para cada mes del año.

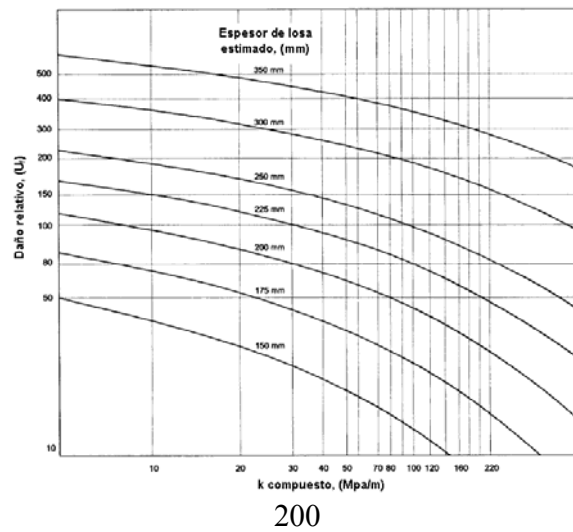
- ✓ El valor de módulo de reacción compuesto del suelo se puede obtener mediante el uso del nomograma de la figura 55, si se cuenta con los parámetros de entrada, los cuales son: módulo de resiliencia de la subrasante, el espesor de la subbase y el coeficiente de elasticidad de la misma.
- ✓ Otra forma de obtener el módulo de reacción compuesto, es asumiendo un espesor inicial de losa y con la ayuda del nomograma de la figura 55, se obtiene el valor relativo de deterioro (U_f) en cada mes del año, para cada uno de los valores de K , en función del espesor de losa propuesto. posteriormente se suman todos los valores relativos de deterioro y este valor se divide en el número de meses incluidos, con el valor que resulta de esta operación se vuelve a entrar a la figura 32, y finalmente se obtiene el valor promedio del coeficiente k para el espesor que se asumió.
- ✓ O también directamente mediante la prueba de prueba de placa, regulada por la norma ASTM D1195 y D1196 que se presenta en el capítulo 2.

Figura 54. Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita.



Fuente: Guía para diseño de estructura de pavimentos, AASHTO, 1993.

Figura 55. Nomograma para determinar el deterioro relativo, (U_f)



Fuente: Guía para diseño de estructura de pavimentos, AASHTO, 1993.

- ♦ **Drenaje.** En cualquier tipo de pavimento, el drenaje, es un factor determinante en el comportamiento de la estructura del pavimento a lo largo de su vida útil, y por lo tanto lo es también en el diseño del mismo. Es muy importante evitar que exista presencia de agua en la estructura de soporte, dado que en caso de presentarse esta situación afectará en gran medida la respuesta estructural del pavimento. para calcular el coeficiente de drenaje del pavimento, se calcula el tiempo de drenaje como se menciona en el capítulo 4 y de acuerdo a este se obtiene la calidad del drenaje como se establece en la tabla (Tabla 57) y posteriormente se puede seleccionar el coeficiente de drenaje C_d , de la siguiente tabla.

Tabla 56. Coeficientes de drenaje para pavimentos rígidos (C_d)

Calidad del drenaje	% del tiempo en que el pavimento esta expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1%-5%	5%-25%	>25%
Excelente	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Bueno	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Regular	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Pobre	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Muy pobre	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Para evitar posibles problemas se deben cuidar aspectos como los siguientes para que el agua no penetre en la estructura de soporte:

- Mantener perfectamente selladas las juntas del pavimento.
- Sellar las juntas entre pavimento y cuneta.
- Colocar barreras rompedoras de capilaridad (en donde se requiera)
- Utilizar cunetas, bordillos, lavaderos, contracunetas, subdrenajes, entre otros.
- Construir o aprovechar los drenajes pluviales en las ciudades.

Tener agua atrapada en la estructura del Pavimento produce efectos nocivos en el mismo, tales como:

- Reducción de la resistencia de materiales granulares no ligados.
- Reducción de la resistencia de la subrasante.
- Expulsión de finos
- Levantamientos diferenciales de suelos expansivos
- Expansión por congelamiento del suelo

Algunos de estos fenómenos se pueden minimizar cuando se utilizan bases estabilizadas con cemento o bases de relleno fluido.

◆ **Confiabilidad.** Los factores estadísticos que influyen el comportamiento de los pavimentos son:

- ✓ Confiabilidad. La confiabilidad esta definida como "la probabilidad de que un pavimento desarrolle su función durante su vida útil en condiciones adecuadas para su operación

Tabla 57. Confiabilidad recomendada por AASHTO

Clasificación funcional	Urbano (%)	Rural (%)
Autopistas	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-99
colectoras	80-95	75-95
locales	50-80	50-80

Como se menciona anteriormente la confiabilidad puede relacionarse con un Factor de Seguridad, a continuación se presentan los factores de seguridad aproximados a los que corresponde la confiabilidad. Estos factores de seguridad van asociados con la Desviación Estándar "So".

Tabla 58 Factor de Seguridad AASHTO

Desviación estándar S_o	Confiabilidad R					
	50%	60%	70%	80%	90%	95%
0.30	1.00	1.19	1.44	1.79	2.42	3.12
0.35	1.00	1.23	1.53	1.97	2.81	3.76
0.39	1.00	1.26	1.60	2.13	3.16	4.38
0.40	1.00	1.26	1.62	2.17	3.26	4.55

$$F_{S_{AASHTO}} = 10^{(-Z_r * S_o)} \quad \text{Ecuación (51)}$$

Donde:

Fs : factor de seguridad

Zr : desviación normal estándar para la confiabilidad "R"

S_o : desviación estándar

❖ **Diseño estructural del pavimento**

- ◆ **Ecuación de la guía AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos:** El método AASHTO para diseño de pavimentos rígidos se fundamenta en la siguiente fórmula general de diseño, la cual relaciona el número de ejes equivalentes de 8,2 Ton con el espesor de la losa de hormigón, para diferentes valores de los parámetros de cálculo.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R * S_o + 7.35 * \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 p_i) * \log_{10} \left[\frac{S'_c C_d (D^{0.75} - 1.1132)}{215.63 * J \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{Kd}\right)^{0.25}} \right)} \right]$$

◆

Ecuación (52)

Donde

W_{18} : Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 ton a lo largo del periodo de diseño

Z_R : Desviación normal estándar

S_o : Error estándar combinado en la predicción del transito y en la variación del comportamiento esperados del pavimento.

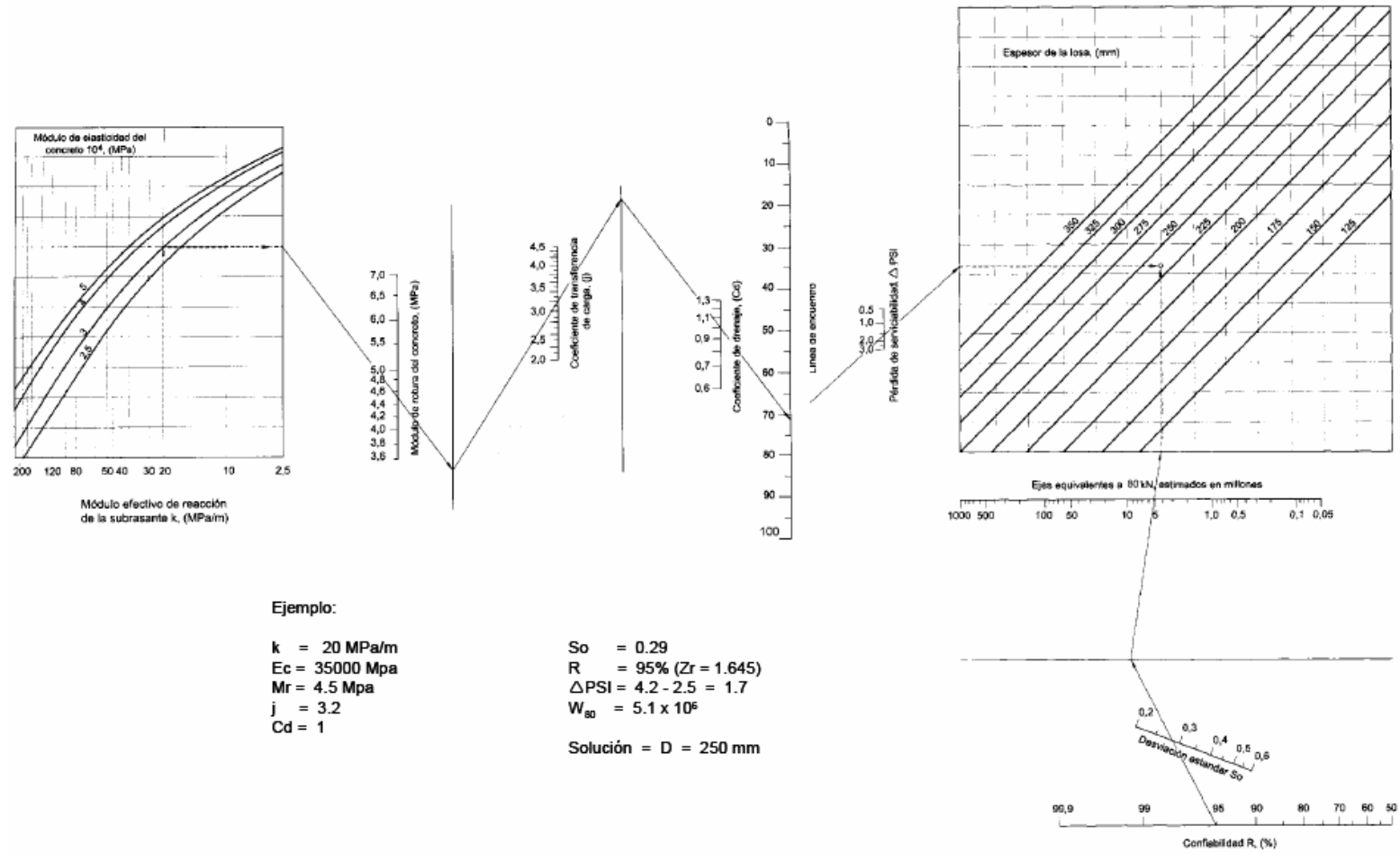
D : Espesor del pavimento en plg.

ΔPSI : Diferencia entre los índices de servivilidad inicial y final.

- P_t : Índice de servivilidad final
- S_c : Módulo de rotura del concreto en Psi
- C_d : Coeficiente de drenaje
- J : Coeficiente de transmisión de carga en juntas.
- E_c : Módulo de elasticidad del concreto en Psi
- K_d : Módulo de reacción de soporte (lb./plg.³) o Pci.

Para facilitar el uso de la ecuación para diseño de pavimentos rígidos según el método establecido por la AASHTO, se creo la siguiente gráfica.

Figura 56. Nomograma de diseño para pavimentos rígidos



Ejemplo:

$k = 20 \text{ MPa/m}$
 $E_c = 35000 \text{ Mpa}$
 $M_r = 4.5 \text{ Mpa}$
 $j = 3.2$
 $C_d = 1$

$S_o = 0.29$
 $R = 95\% (Z_r = 1.645)$
 $\Delta \text{ PSI} = 4.2 - 2.5 = 1.7$
 $W_{80} = 5.1 \times 10^6$

Solución = $D = 250 \text{ mm}$

El procedimiento de diseño normal es suponer un espesor de pavimento e iniciar a realizar tanteos, con el espesor supuesto calcular los Ejes Equivalentes y posteriormente evaluar todos los factores adicionales de diseño, si se cumple el equilibrio en la ecuación el espesor supuesto es el resultado del problema, en caso de no haber equilibrio en la ecuación se deberán seguir haciendo tanteos tomando como valor semilla el resultado del tanteo anterior. La convergencia del método es muy rápida.

Ejemplo resuelto

1. Para las siguientes condiciones, calcule el espesor de la losa.

- Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 ton a lo largo del periodo de diseño. $W_{18} = 43 \times 10^6$
- Módulo de reacción de soporte: $K_d = 800$ pci
- módulo de rotura del concreto: $S'_c = 4.5$ Mpa = 640 psi.
- Módulo elástico del concreto $E_c = 4 \times 10^6$
- Coeficiente de transmisión de carga con bermas de asfalto y dovelas $J = 3.2$
- Coeficiente de drenaje: $C_d = 1.0$
- Error estándar combinado $S_o = 0.35$
- confiabilidad $R = 95\%$
- índice de servivilidad inicial $P_o = 3.5$
- índice de servivilidad final $P_f = 1.5$

Solución:

- a. Con los valores de índice de servivilidad inicial y final, se calcula con la ecuación (16) el cambio total en el índice de servicio ΔPSI .

$$\Delta PSI = P_o - P_t \Rightarrow \Delta PSI = 3.5 - 1.5 = 2$$

b. Calculo del valor de la desviación estándar normal: para obtener este valor se emplea la tabla (49) la cual esta en función de el valor de confiabilidad. $\Rightarrow Z_R = -1.645$

c. Después de tener todos los parámetros se, se procede a usar la ecuación (52) o la figura 56 para determinar el espesor de la losa.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R * S_o + 7.35 * \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 p_t) * \log_{10} \left[\frac{S'_c C_d (D^{0.75} - 1.1132)}{215.63 * J \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}} \right)} \right]$$

$$\log_{10}(43 \times 10^6) = -1.645 * 0.35 + 7.35 * \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{2}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32(1.5)) * \log_{10} \left[\frac{(640 \text{ psi}) * (1) * (D^{0.75} - 1.1132)}{215.63 * (3.2) * \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{4 \times 10^6 \text{ psi}}{800 \text{ pci}}\right)^{0.25}} \right)} \right]$$

Despejando de esta ecuación despejamos el espesor de la losa D entonces tenemos: **D= 6.4 plg = 16.3 cm.**

5.1.2. Método de la *portland cement association* (PCA)

El método de diseño de la Portland Cement Association es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto. Este método se fundamenta en varias teorías de pavimentos como Westergaard, Picket and Ray, así como de elementos finitos. También la experiencia en el comportamiento de varias pruebas e investigaciones como la Arlington Test y diversos proyectos de la misma PCA. Y derivado de lo anterior se generó finalmente este método de diseño.

Parte del método fue desarrollado interpretando los resultados del modelo de elementos finitos basados en el comportamiento de una losa de espesor variable y dimensiones finitas (180 x 144 pulgadas) a la cuál se le aplicaron cargas al centro, de borde y de esquina, considerando diferentes condiciones de apoyo y soporte. El método de diseño de pavimentos PCA establece los siguientes criterios:

- ◆ **Análisis de Fatiga:** esta sirve par mantener los esfuerzos que se producen dentro de los limites de seguridad, ya que el paso de cargas sobre las losas del pavimentos producen esfuerzos que se convierten en agrietamientos.
- ◆ **Análisis de Erosión:** Para limitar los efectos de la deflexión del pavimento en los bordes de las losas, juntas, esquinas y controlar así la erosión de la fundación y de los materiales de las bermas, o sea controlar el bombeo, desnivel entre losas y deterioro de las bermas aspectos que son independientes de la fatiga

A diferencia del método AASHTO el método de diseño PCA, consideró un valor fijo de módulo de elasticidad del Concreto (E_c) = 4'000,000 psi que no lo hizo

variar en relación con la resistencia a la flexión del concreto (M_R), así como tampoco varió el coeficiente de poisson de 0.15.

Este método considera algunas limitaciones en los valores de módulo de reacción K del suelo, en donde el rango de valores para los que el método fue desarrollado oscila entre los 50 y 700 psi. Una ventaja que se debe reconocer en el método del PCA es que toma el tráfico real que estima circulará sobre el pavimento, sin convertirlo Ejes Sencillos Equivalentes.

❖ **Las hipótesis fundamentales que son base de diseño de la PCA (1966) son:**

- ✓ El espesor de la losa debe ser uniforme. Debido a que ocurren pocas aplicaciones de carga en los bordes de las losas, el efecto de las cargas en los bordes no es crítico. Pero disminuir el espesor en bordes sería impráctico y costoso.
- ✓ Los esfuerzos críticos ocurren cuando las ruedas se posicionan en el borde de la junta transversal, directamente debajo el punto donde las repeticiones de carga son más frecuentes los esfuerzos por otras posiciones de carga de las ruedas son pequeños.
- ✓ Los máximos esfuerzos a la tracción ocurren en la parte inferior de la losa y directamente bajo carga; los momentos producidos actúan en un plano vertical paralelo al borde de la junta.
- ✓ Aunque la previsión de una efectiva transferencia de carga en la sección transversal de las juntas es esencial para prevenir que ocurran fallas, ninguna medida es adoptada para reducir el resultado en los esfuerzos.

- ✓ El objetivo del diseño es prevenir la falla por fatiga de flexión que puede darse bajo la acción repetida de cargas. Así pues puede ignorarse el efecto de las cargas de rueda que producen esfuerzos

❖ Tipos de pavimentos rígidos

Según el manual de la PCA existen diversos tipos de pavimentos rígidos a los cuales se les puede aplicar este método y son:

- ◆ ***Pavimentos de concreto simple:*** este tipo de pavimentos no tiene acero de refuerzo o varillas de transferencia de carga en las juntas, ya que la transferencia se logra a través del refuerzo de corte proporcionado por los agregados situados en las caras agrietadas que se forman por el corte de la junta entre losas contiguas; para que esta transferencia sea efectiva es necesario que la longitud de las losas sean cortas.
- ◆ ***Pavimentos de concreto simple con varillas de transferencia de carga (dovelas).*** este tipo de pavimentos no tiene acero de refuerzo, pero en las juntas de contracción se colocan varillas lisas que tienen la función de transmitir cargas a las otras losas; además es conveniente que las losas sean cortas para poder controlar posibles grietas.
- ◆ ***Pavimentos de concreto reforzado:*** este tipo de pavimentos si tiene acero dentro de la losa y también tienen varillas de transferencia de carga en las juntas de contracción. Además pueden tener separación entre juntas superior a las de los pavimentos ya mencionados, pero por esta razón se pueden presentar fisuras transversales entre las juntas,

las cuales se mantiene prácticamente cerradas debido al refuerzo de acero, lo que permite una mejor transferencia de cargas.

- ◆ **Pavimentos de refuerzo continuo:** estos se construyen sin junta de contracción; ya que contiene una alta y continua cantidad de acero de refuerzo en dirección longitudinal, pero por esta razón el pavimento presenta fisuras transversales, que se sostienen unidas por el refuerzo de acero. Regularmente, el agrietamiento comenzará pocos días después de la construcción, con la producción plena de agrietamiento en alguno de los primeros años. El acero para refuerzo en los pavimentos continuos de concreto reforzados en general está compuesto de varillas corrugadas, malla de barras o malla de alambre deformado.

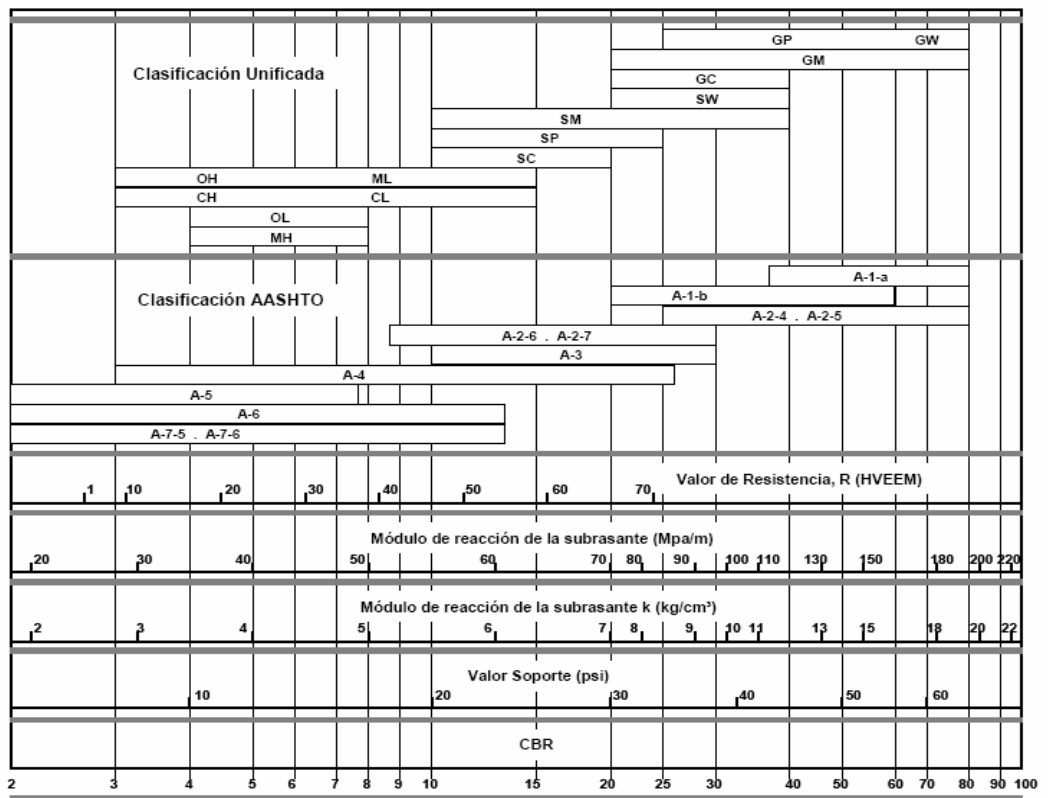
❖ **Parámetros de diseño**

Los principales parámetros que considera el método para el diseño son los siguientes:

- ◆ **Resistencia de la capa de apoyo de la losa de concreto (K).** El método establece como parámetro de resistencia el valor del módulo de reacción de la capa subrasante cuando la losa va apoyada directamente sobre ella o adopta el valor del módulo de reacción del conjunto Subbase/Subrasante cuando se usan los diferentes tipos de subbase. Debido a que el ensayo correspondiente (Norma AASHTO T 222-78) es lento y costoso de realizar, habitualmente se calcula correlacionándolo con otro tipo de ensayos más rápidos de ejecutar, tales como la clasificación de suelos o el ensayo CBR. Este procedimiento es válido ya que no es necesario conocer el valor exacto de K, debido a que

variaciones pequeñas de este valor, prácticamente no afectan los espesores necesarios del pavimento. A continuación se presenta una gráfica en la cual las relaciones que se muestran son satisfactorias para este método.

Figura 57. Relaciones aproximada ente los valores de resistencia y clasificación del suelo



Fuente: manual centroamericano

Las subbase son necesarias con el objeto de porvenir el efecto de succión, pero además incrementan la capacidad soporte del pavimento, situación que se aprovecha con el objeto de poder reducir el espesor de la losa. A continuación se presenta dos tabla, la tabla (59) donde se muestra como incrementa el valor de K al colocar una subbase granular y la tabla (60) se muestra el incremento que se puede presentar en el módulo si se coloca una subbase tratada con cemento.

Tabla 59. Efecto de la subbase granular sobre el valor de K

Valor de K para subrasante		Valor de k para subbase							
		100 mm.		150 mm.		225 mm.		300 mm.	
Mpa./m	lb./pulg. ³	Mpa./m	lb./pulg. ³	Mpa./m	lb./pulg. ³	Mpa./m	lb./pulg. ³	Mpa./m	lb./pulg. ³
20	73	23	85	26	96	35	38	38	140
40	127	45	165	49	180	57	66	66	245
60	220	64	235	66	245	76	90	90	330
80	295	87	320	90	330	100	117	117	430

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimento AASHTO-1993

Tabla 60. Valores de diseño par subbase tratada con cemento

Valor de K para subrasante		Valor de k para subbase							
		100 mm.		150 mm.		225 mm.		300 mm.	
Mpa./m	lb./pulg. ³	Mpa./m	lb./pulg. ³	Mpa./m	lb./pulg. ³	Mpa./m	lb./pulg. ³	Mpa./m	lb./pulg. ³
20	73	60	220	80	300	105	400	135	500
40	127	100	370	130	500	185	680	230	850
60	220	140	520	190	700	245	900	-	-

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimento AASHTO, 1993

◆ **Transito:** las principales características de tránsito que se relacionan con el diseño de pavimento rígido son el número de pasadas de ejes y la magnitud de las cargas por eje más pesadas que se esperan durante el periodo de diseño, ya que las cargas más pesadas por eje son las que definen los esfuerzos a los que va a estar sometido dicho pavimento. Los valores de tránsito a obtener se clasifican así:

- TPD tránsito promedio diario en ambas direcciones
- TPD-C tránsito promedio diario de vehículos pesados en ambas direcciones
- Cargas por eje de los vehículos pesados

Un método para obtener el tránsito para el diseño consiste en asumir tasas de crecimiento anual que relacionen factores de proyección; en la siguiente tabla se presenta la relación entre las tasas de crecimiento anual y los factores de proyección para periodos de 20 y 40 años, conforme a las recomendaciones de la PCA.

Tabla 61. Tasas anuales de crecimiento de tránsito y sus correspondientes factores de proyección

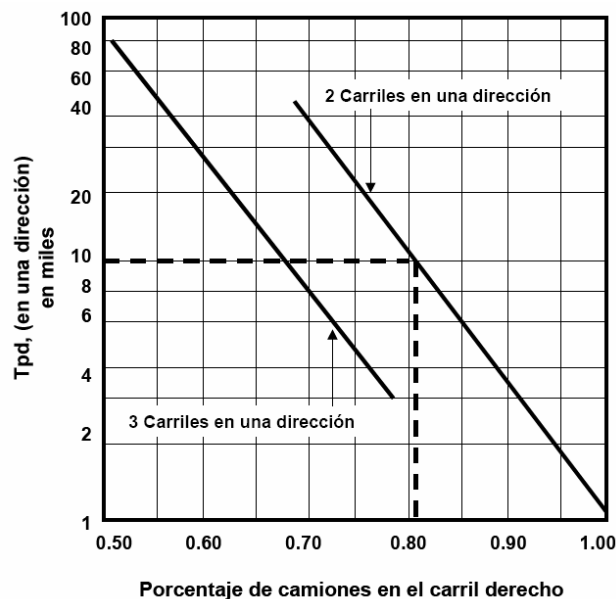
Tasa de crecimiento anual de tránsito %	Factores de proyección	
	20 años	40 años
1	1.1	1.2
1 ½	1.2	1.3
2	1.2	1.5
2 ½	1.3	1.6
3	1.3	1.8
3 ½	1.4	2.0
4	1.5	2.2

Tasa de crecimiento anual de tránsito %	Factores de proyección	
	20 años	40 años
4½	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5½	1.7	2.9
6	1.8	3.2

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimento AASHTO 1993

El TPD-C es un dato importante en el diseño de pavimentos ya que debe obtenerse el número total esperado de vínculos comerciales (buses y camiones), durante el periodo de diseño. Este valor se obtiene multiplicando el TPD de diseño por el porcentaje de vehículos comerciales dividido por 100 y luego multiplicado por el número de días del periodo de diseño. Para vías de 4 o mas carriles el porcentaje de vehículos comerciales debe de ajustarse utilizando la siguiente gráfica.

Figura 58. Porcentaje de vehículos comerciales en el carril derecho de una carretera de carriles múltiples (con separador central).



Factor de seguridad de carga; este método de diseño exige que las cargas reales esperadas se multipliquen por un factor de seguridad de carga (F_{sc}), para lo cual se recomiendan los siguientes:

- Para vías que tiene múltiples carriles, en los cuales se espera un elevado volumen de trafico pesado, $F_{sc} = 1.2$.
 - Para carreteras y vías urbanas en las que el transito esperado es de un volumen moderado de vehículos pesados, $F_{sc} = 1.2$
 - Para calles residenciales y otras que soporten bajo volumen de transito de camiones, $F_{sc} = 1.0$.
-
- ◆ **Periodo De Diseño (T).** Normalmente estas estructuras se diseñan para periodos mayores de 20 años. Este parámetro se considera en la estimación de la variable tránsito.
 - ◆ **Resistencia Del Concreto.** la resistencia del concreto a utilizarse es la resistencia media a la flexotracción a 28 días, la cual se determina a través del ensayo AASHTO T-97. o también se puede atener mediante el módulo de reacción (M_r), el cual se recomienda que esté en un rango entre 40 y 50 Kg./cm^2 .
 - ◆ **Tipo De Juntas y Bermas.** Con el fin de realizar los análisis de fatiga y erosión el método contempla dentro de sus análisis la incidencia de la protección lateral de las losa de concreto y el tipo de transmisión de cargas en las juntas.

Nota: El cálculo de N se hace con base en la tabla y ábacos del método concebido por la PCA y estos resultados se registran en el formato que se presenta en la tabla 62.

Tabla 62. Formato para el cálculo de espesor del pavimento.

Obra: Diseño vía rural de 4 carriles, subbase granular 100 mm.						
Espesor de tanteo <u>9.5</u> pulg.			Juntas con pasadores si <u>x</u> no <u> </u>			
K combinado <u>130</u> Psi/ pulg.			Bermas de concreto si <u> </u> no <u>x</u>			
Módulo de rotura MR <u>650</u> Psi			Periodo de diseño <u>20</u> años			
Factor de seguridad de la carga (Fsc) <u>1.2</u>						
Carga por eje (KN)	Multiplicado por (Fsc)	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		análisis de erosión	
			Repeticiones admisibles	Porcentaje de fatiga (%)	Repeticiones admisibles	Porcentaje de daño (%)
1	2	3	4	5	6	7
8, esfuerzo equivalente <u>206</u>			10, Factor de erosión <u>2.59</u>			
9, Factor de relación de esfuerzos <u>0.317</u>						
Eje sencillo						
30	36	6300	27000	23.4	1500000	0.4
28	33.6	14690	77000	19.1	2200000	0.7
26	31.2	30140	230000	13.1	3500000	0.9
26	38.8	64410	1200000	5.4	5900000	1.1
24	26.4	106900	ilimitado	0	11000000	1.0
22	24	235800			23000000	1.0
20	21.3	301200			64000000	0.5
18	19.2	422500			ilimitados	0
16	16.8	586900				
	14.4	1837000				
11, Esfuerzo equivalente <u>192</u>			13, Factor de erosión <u>2.79</u>			
12, Factor de relación de esfuerzos <u>0.295</u>						
Eje tándem						
52	62.4	21320	1100000	1.9	920000	2.3
48	57.6	42870	ilimitado	0	1500000	2.9
44	52.8	124900			2500000	5
40	48.0	372900			4600000	8.1
36	43.2	885800			95000000	9.3
32	38.4	930100			24000000	3.9
28	33.6	1653000			92000000	1.8
$\Sigma = 62.9\%$				$\Sigma = 38.9\%$		

Tabla 63. Esfuerzo equivalente sin berma de concreto (eje sencillo, tándem y tridem)

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri
4.0	825	679	510	726	585	456	671	542	437	634	516	428	584	486	419	523	457	414	484	443	412
4.5	699	586	439	616	500	380	571	460	359	540	435	349	498	406	339	448	378	331	417	363	328
5.0	602	516	387	531	436	328	493	399	305	467	376	293	432	349	282	390	321	272	363	307	269
5.5	526	461	347	464	387	290	431	353	266	409	331	253	379	305	240	343	278	230	320	264	226
6.0	465	416	315	411	348	261	382	316	237	362	296	223	336	271	209	304	246	198	285	232	193
6.5	417	380	289	367	317	238	341	286	214	324	267	201	300	244	186	273	220	173	256	207	168
7.0	375	349	267	331	290	219	307	262	196	292	244	183	272	222	167	246	199	154	231	186	148
7.5	340	323	247	300	268	203	279	241	181	265	224	168	246	203	153	224	181	139	210	169	132
8.0	311	300	230	274	249	189	255	223	168	242	208	156	225	188	141	205	167	126	192	155	120
8.5	285	281	215	252	232	177	234	208	158	222	193	145	206	174	131	188	154	116	177	143	109
9.0	264	264	200	232	218	166	216	195	148	205	181	136	190	163	122	174	144	108	163	133	101
9.5	245	248	187	215	205	157	200	183	140	190	170	129	176	153	115	161	134	101	151	124	93
10.0	228	235	174	200	193	148	186	173	132	177	160	122	164	144	108	150	126	95	141	117	87
10.5	213	222	163	187	183	140	174	164	125	165	151	115	153	136	103	140	119	89	132	110	82
11.0	200	211	153	175	174	132	163	155	119	154	143	110	144	129	98	131	113	85	123	104	78
11.5	188	201	142	165	165	125	153	148	113	145	136	104	135	122	93	123	107	80	116	98	74
12.0	177	192	133	155	158	119	144	141	108	137	130	100	127	116	89	116	102	77	109	93	70
12.5	168	183	123	147	151	113	136	135	103	129	124	95	120	111	85	109	97	73	103	89	67
13.0	159	176	114	139	144	107	129	129	98	122	119	91	113	106	81	103	93	70	97	85	64
13.5	152	168	105	132	138	101	122	123	93	116	114	87	107	102	78	98	89	67	92	81	61
14.0	144	162	97	125	133	96	116	118	89	110	109	83	102	98	75	93	85	65	88	78	59

Tabla 64. Esfuerzo equivalente con berma de concreto (eje simple, tándem y tridem)

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri	Sen	Tân	Tri
4.0	640	534	431	559	468	392	517	439	377	489	422	369	452	403	362	409	388	360	383	384	359
4.5	547	461	365	479	400	328	444	372	313	421	356	305	390	338	297	355	322	292	333	316	291
5.0	475	404	317	417	349	281	387	323	266	367	308	258	341	290	250	311	274	244	294	267	242
5.5	418	360	279	368	309	246	342	285	231	324	271	223	302	254	214	276	238	208	261	231	206
6.0	372	325	249	327	277	218	304	255	204	289	241	196	270	225	187	247	210	180	234	203	178
6.5	334	295	225	294	251	196	274	230	183	260	218	175	243	203	166	223	188	159	212	180	156
7.0	302	270	204	266	230	178	248	210	165	236	198	158	220	184	149	203	170	142	192	162	138
7.5	275	250	187	243	211	162	226	193	151	215	182	143	201	168	135	185	155	127	176	148	124
8.0	252	232	172	222	196	149	207	179	138	197	168	131	185	155	123	170	142	116	162	135	112
8.5	232	216	159	205	182	138	191	166	128	182	156	121	170	144	113	157	131	106	150	125	102
9.0	215	202	147	190	171	128	177	155	119	169	146	112	158	134	105	146	122	98	139	116	94
9.5	200	190	137	176	160	120	164	146	111	157	137	105	147	126	98	136	114	91	129	108	87
10.0	186	179	127	164	151	112	153	137	104	146	129	98	137	118	91	127	107	84	121	101	81
10.5	174	170	119	154	143	105	144	130	97	137	121	92	128	111	86	119	101	79	113	95	76
11.0	164	161	111	144	135	99	135	123	92	129	115	87	120	105	81	112	95	74	106	90	71
11.5	154	153	104	136	128	93	127	117	86	121	109	82	113	100	76	105	90	70	100	85	67
12.0	145	146	97	128	122	88	120	111	82	114	104	78	107	95	72	99	86	66	95	81	63
12.5	137	139	91	121	117	83	113	106	78	108	99	74	101	91	68	94	82	63	90	77	60
13.0	130	133	85	115	112	79	107	101	74	102	95	70	96	86	65	89	78	60	85	73	57
13.5	124	124	80	109	107	75	102	97	70	97	91	67	91	83	62	85	74	57	81	70	54
14.0	118	122	75	104	103	71	97	93	67	93	87	63	87	79	59	81	71	54	77	67	51

Figura 59. Análisis de fatiga-Repetición de carga admisible con base en el factor de relación de esfuerzos (con y sin bermas de concreto.)

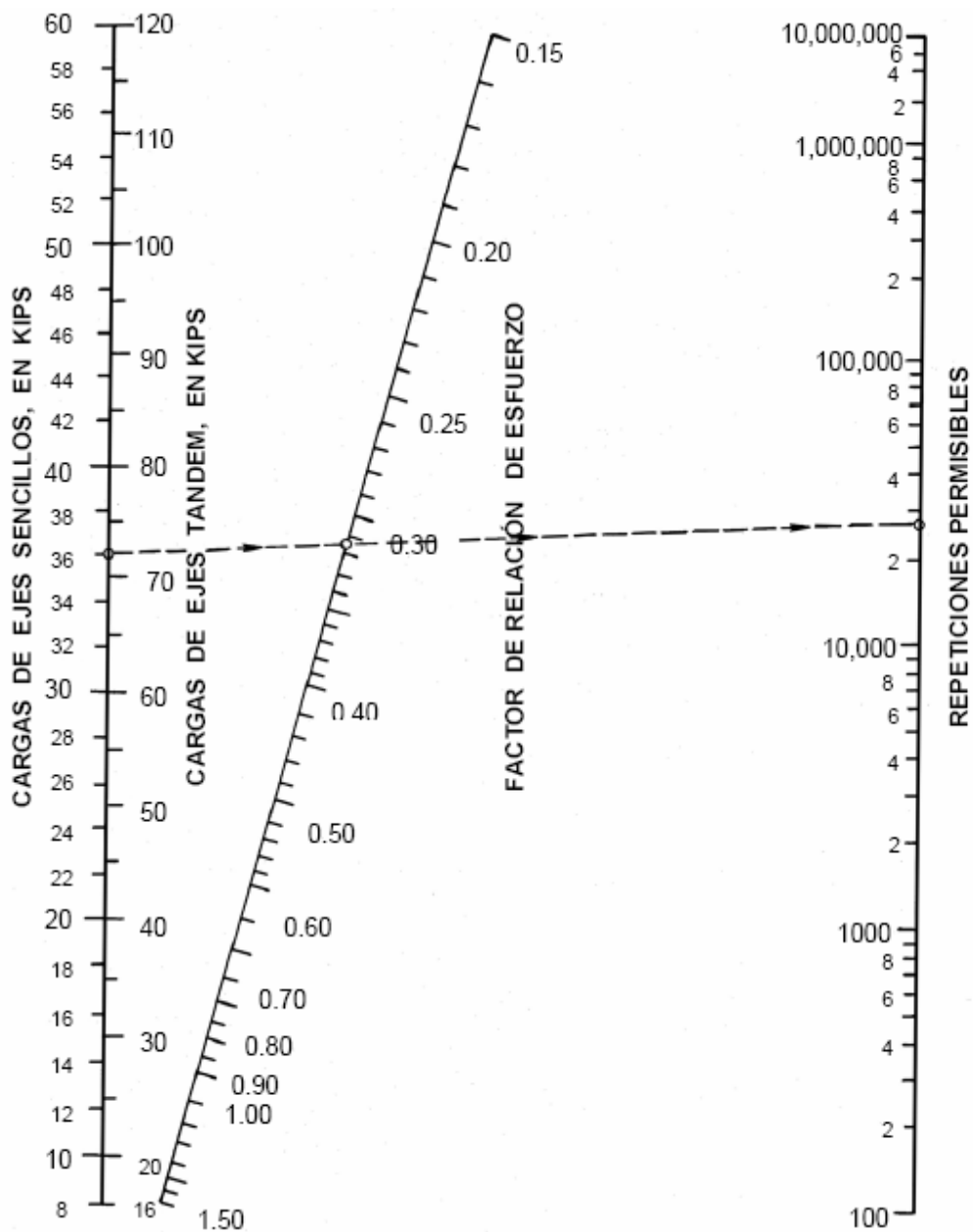


Tabla 65. Factor de erosión juntas con pasadores sin bermas en concreto (eje simple, tándem y tridem)

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			30			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.74	3.83	3.89	3.73	3.79	3.82	3.72	3.75	3.75	3.71	3.73	3.70	3.70	3.70	3.61	3.68	3.67	3.53
4.5	3.59	3.70	3.78	3.57	3.65	3.69	3.56	3.61	3.62	3.55	3.58	3.57	3.54	3.55	3.50	3.52	3.53	3.44
5.0	3.45	3.58	3.68	3.43	3.52	3.58	3.42	3.48	3.50	3.41	3.45	3.46	3.40	3.42	3.40	3.38	3.40	3.34
5.5	3.33	3.47	3.59	3.31	3.41	3.49	3.29	3.36	3.40	3.28	3.33	3.36	3.27	3.30	3.30	3.26	3.28	3.25
6.0	3.22	3.38	3.51	3.19	3.31	3.40	3.18	3.26	3.31	3.17	3.23	3.26	3.15	3.20	3.21	3.14	3.17	3.16
6.5	3.11	3.29	3.44	3.09	3.22	3.33	3.07	3.16	3.23	3.06	3.13	3.18	3.05	3.10	3.12	3.03	3.07	3.08
7.0	3.02	3.21	3.37	2.99	3.14	3.26	2.97	3.08	3.16	2.96	3.05	3.10	2.95	3.01	3.04	2.94	2.98	3.00
7.5	2.93	3.14	3.31	2.91	3.06	3.20	2.88	3.00	3.09	2.87	2.97	3.03	2.86	2.93	2.97	2.84	2.90	2.93
8.0	2.85	3.07	3.26	2.82	2.99	3.14	2.80	2.93	3.03	2.79	2.89	2.97	2.77	2.85	2.90	2.76	2.82	2.86
8.5	2.77	3.01	3.20	2.74	2.93	3.09	2.72	2.86	2.97	2.71	2.82	2.91	2.69	2.78	2.84	2.68	2.75	2.79
9.0	2.70	2.96	3.15	2.67	2.87	3.04	2.65	2.80	2.92	2.63	2.76	2.86	2.62	2.71	2.78	2.61	2.68	2.73
9.5	2.63	2.90	3.11	2.60	2.81	2.99	2.58	2.74	2.87	2.56	2.70	2.81	2.55	2.65	2.73	2.54	2.62	2.68
10.0	2.56	2.85	3.06	2.54	2.76	2.94	2.51	2.68	2.83	2.50	2.64	2.76	2.48	2.59	2.68	2.47	2.56	2.63
10.5	2.50	2.81	3.02	2.47	2.71	2.90	2.45	2.63	2.78	2.44	2.59	2.72	2.42	2.54	2.64	2.41	2.51	2.58
11.0	2.44	2.76	2.98	2.42	2.67	2.86	2.39	2.58	2.74	2.38	2.54	2.68	2.36	2.49	2.59	2.35	2.45	2.54
11.5	2.38	2.72	2.94	2.36	2.62	2.82	2.33	2.54	2.70	2.32	2.49	2.64	2.30	2.44	2.55	2.29	2.40	2.50
12.0	2.33	2.68	2.91	2.30	2.58	2.79	2.28	2.49	2.67	2.26	2.44	2.60	2.25	2.39	2.51	2.23	2.36	2.46
12.5	2.28	2.64	2.87	2.25	2.54	2.75	2.23	2.45	2.63	2.21	2.40	2.56	2.19	2.35	2.48	2.18	2.31	2.42
13.0	2.23	2.61	2.84	2.20	2.50	2.72	2.18	2.41	2.60	2.16	2.36	2.53	2.14	2.30	2.44	2.13	2.27	2.39
13.5	2.18	2.57	2.81	2.15	2.47	2.68	2.13	2.37	2.56	2.11	2.32	2.49	2.09	2.26	2.41	2.08	2.23	2.35
14.0	2.13	2.54	2.78	2.11	2.43	2.65	2.08	2.34	2.53	2.07	2.29	2.46	2.05	2.23	2.38	2.03	2.19	2.32

Tabla 66. Factor de erosión. Trabazón de agregados, sin bermas de concreto (eje sencillo, tándem y tridem)

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			30			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.94	4.03	4.06	3.91	3.95	3.97	3.88	3.89	3.88	3.86	3.86	3.82	3.82	3.83	3.74	3.77	3.80	3.67
4.5	3.79	3.91	3.95	3.76	3.82	3.85	3.73	3.75	3.76	3.71	3.72	3.70	3.68	3.68	3.63	3.64	3.65	3.56
5.0	3.66	3.81	3.85	3.63	3.72	3.75	3.60	3.64	3.66	3.58	3.60	3.60	3.55	3.55	3.52	3.52	3.52	3.46
5.5	3.54	3.72	3.76	3.51	3.62	3.66	3.48	3.53	3.56	3.46	3.49	3.51	3.43	3.44	3.43	3.41	3.40	3.37
6.0	3.44	3.64	3.68	3.40	3.53	3.58	3.37	3.44	3.48	3.35	3.40	3.42	3.32	3.34	3.35	3.30	3.30	3.29
6.5	3.34	3.56	3.61	3.30	3.46	3.50	3.26	3.36	3.40	3.25	3.31	3.34	3.22	3.25	3.27	3.20	3.21	3.21
7.0	3.26	3.49	3.54	3.21	3.39	3.43	3.17	3.29	3.33	3.15	3.24	3.27	3.13	3.17	3.20	3.11	3.13	3.14
7.5	3.18	3.43	3.48	3.13	3.32	3.37	3.09	3.22	3.26	3.07	3.17	3.20	3.04	3.10	3.13	3.02	3.06	3.08
8.0	3.11	3.37	3.42	3.05	3.26	3.31	3.01	3.16	3.20	2.99	3.10	3.14	2.96	3.03	3.07	2.94	2.99	3.01
8.5	3.04	3.32	3.37	2.98	3.21	3.25	2.93	3.10	3.15	2.91	3.04	3.09	2.88	2.97	3.01	2.87	2.93	2.96
9.0	2.98	3.27	3.32	2.91	3.16	3.20	2.86	3.05	3.09	2.84	2.99	3.03	2.81	2.92	2.95	2.79	2.87	2.90
9.5	2.92	3.22	3.27	2.85	3.11	3.15	2.80	3.00	3.04	2.77	2.94	2.98	2.75	2.86	2.90	2.73	2.81	2.85
10.0	2.86	3.18	3.22	2.79	3.06	3.11	2.74	2.95	3.00	2.71	2.89	2.93	2.68	2.81	2.85	2.66	2.76	2.80
10.5	2.81	3.14	3.18	2.74	3.02	3.06	2.68	2.91	2.95	2.65	2.84	2.89	2.62	2.76	2.81	2.60	2.72	2.76
11.0	2.77	3.10	3.14	2.69	2.98	3.02	2.63	2.86	2.91	2.60	2.80	2.84	2.57	2.72	2.77	2.54	2.67	2.71
11.5	2.72	3.06	3.10	2.64	2.94	2.98	2.58	2.82	2.87	2.55	2.76	2.80	2.51	2.68	2.72	2.49	2.63	2.67
12.0	2.68	3.03	3.07	2.60	2.90	2.95	2.53	2.78	2.83	2.50	2.72	2.76	2.46	2.64	2.68	2.44	2.59	2.63
12.5	2.64	2.99	3.03	2.55	2.87	2.91	2.48	2.75	2.79	2.45	2.68	2.73	2.41	2.60	2.65	2.39	2.55	2.59
13.0	2.60	2.96	3.00	2.51	2.83	2.88	2.44	2.71	2.76	2.40	2.65	2.69	2.36	2.56	2.61	2.34	2.51	2.56
13.5	2.56	2.93	2.97	2.47	2.80	2.84	2.40	2.68	2.73	2.36	2.61	2.66	2.32	2.53	2.58	2.30	2.48	2.52
14.0	2.53	2.90	2.94	2.44	2.77	2.81	2.36	2.65	2.69	2.32	2.58	2.63	2.28	2.50	2.54	2.25	2.44	2.49

Figura 60. Repetición de carga admisible con base en el factor de erosión (sin bermas de concreto)

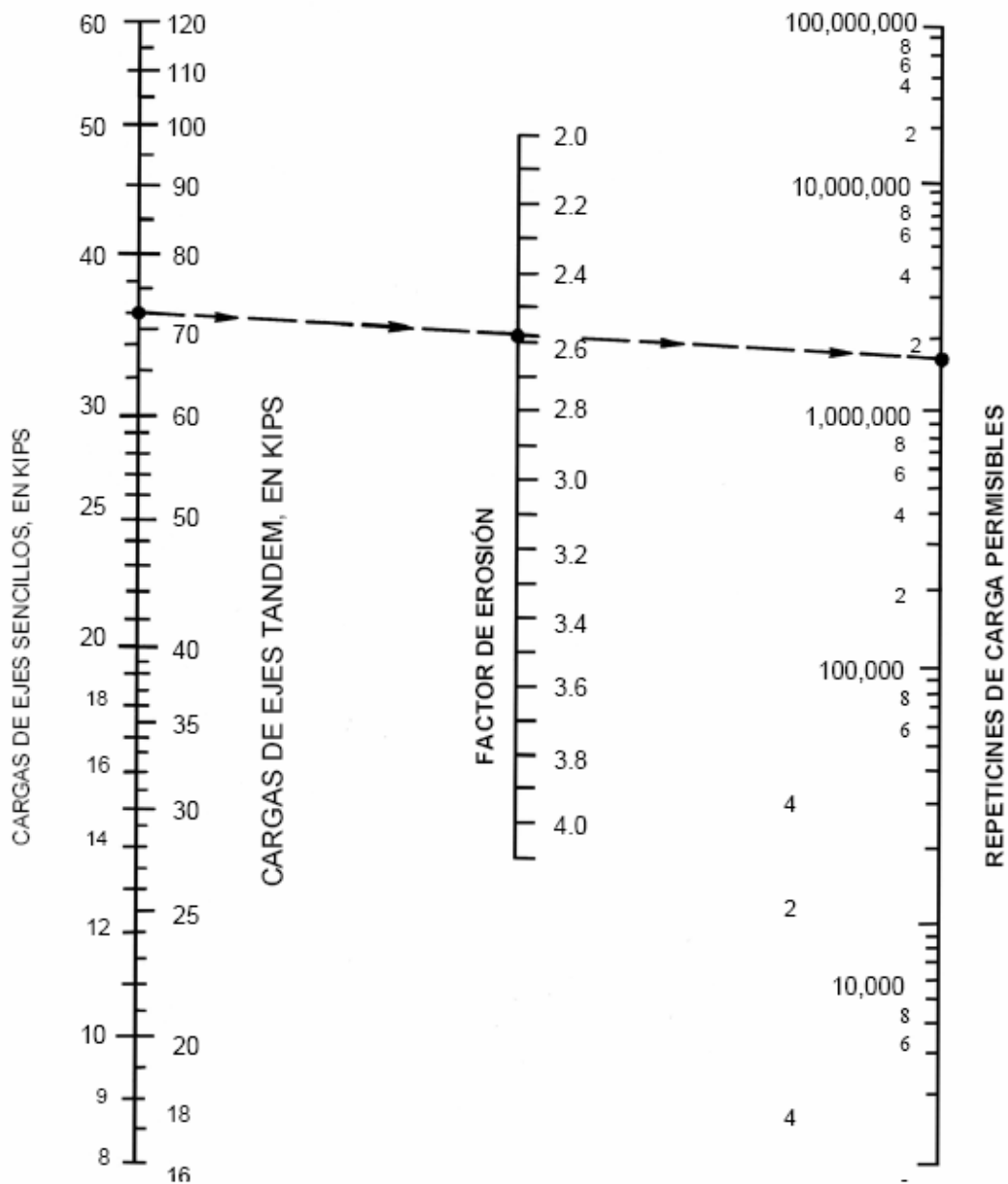


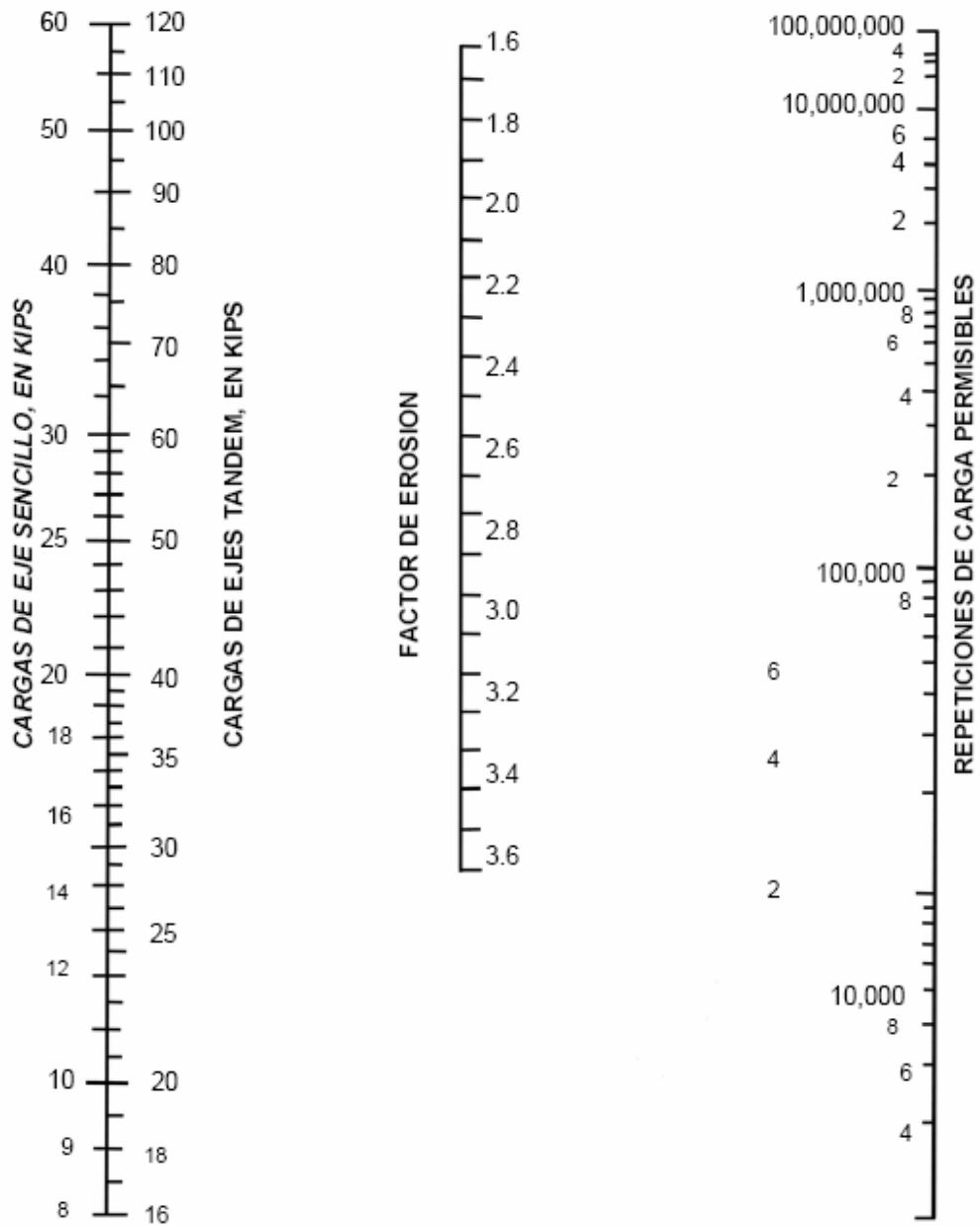
Tabla 67. Factores de erosión –juntas con pasadores- bermas de concreto (eje sencillo, tándem y tridem)

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			30			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.28	3.30	3.33	3.24	3.20	3.20	3.21	3.13	3.13	3.19	3.10	3.10	3.15	3.09	3.05	3.12	3.08	3.00
4.5	3.13	3.19	3.24	3.09	3.08	3.10	3.06	3.00	2.99	3.04	2.96	2.95	3.01	2.93	2.91	2.98	2.91	2.87
5.0	3.01	3.09	3.16	2.97	2.98	3.01	2.93	2.89	2.89	2.90	2.84	2.83	2.87	2.79	2.79	2.85	2.77	2.75
5.5	2.90	3.01	3.09	2.85	2.89	2.94	2.81	2.79	2.80	2.79	2.74	2.74	2.76	2.68	2.67	2.73	2.65	2.64
6.0	2.79	2.93	3.03	2.75	2.82	2.87	2.70	2.71	2.73	2.68	2.65	2.66	2.65	2.58	2.58	2.62	2.54	2.54
6.5	2.70	2.86	2.97	2.65	2.75	2.82	2.61	2.63	2.67	2.58	2.57	2.59	2.55	2.50	2.50	2.52	2.45	2.45
7.0	2.61	2.79	2.92	2.56	2.68	2.76	2.52	2.56	2.61	2.49	2.50	2.53	2.46	2.42	2.43	2.43	2.38	2.37
7.5	2.53	2.73	2.87	2.48	2.62	2.72	2.44	2.50	2.56	2.41	2.44	2.47	2.38	2.36	2.37	2.35	2.31	2.31
8.0	2.46	2.68	2.83	2.41	2.56	2.67	2.36	2.44	2.51	2.33	2.38	2.42	2.30	2.30	2.32	2.27	2.24	2.25
8.5	2.39	2.62	2.79	2.34	2.51	2.63	2.29	2.39	2.47	2.26	2.32	2.38	2.22	2.24	2.27	2.20	2.18	2.20
9.0	2.32	2.57	2.75	2.27	2.46	2.59	2.22	2.34	2.43	2.19	2.27	2.34	2.16	2.19	2.23	2.13	2.13	2.15
9.5	2.26	2.52	2.71	2.21	2.41	2.55	2.16	2.29	2.39	2.13	2.22	2.30	2.09	2.14	2.18	2.07	2.08	2.11
10.0	2.20	2.47	2.67	2.15	2.36	2.51	2.10	2.25	2.35	2.07	2.18	2.26	2.03	2.09	2.15	2.01	2.03	2.07
10.5	2.15	2.43	2.64	2.09	2.32	2.48	2.04	2.20	2.32	2.01	2.14	2.23	1.97	2.05	2.11	1.95	1.99	2.04
11.0	2.10	2.39	2.60	2.04	2.28	2.45	1.99	2.16	2.29	1.95	2.09	2.20	1.92	2.01	2.08	1.89	1.95	2.00
11.5	2.05	2.35	2.57	1.99	2.24	2.42	1.93	2.12	2.26	1.90	2.05	2.16	1.87	1.97	2.05	1.84	1.91	1.97
12.0	2.00	2.31	2.54	1.94	2.20	2.39	1.88	2.09	2.23	1.85	2.02	2.13	1.82	1.93	2.02	1.79	1.87	1.94
12.5	1.95	2.27	2.51	1.89	2.16	2.36	1.84	2.05	2.20	1.81	1.98	2.11	1.77	1.89	1.99	1.74	1.84	1.91
13.0	1.91	2.23	2.48	1.85	2.13	2.33	1.79	2.01	2.17	1.76	1.95	2.08	1.72	1.86	1.96	1.70	1.80	1.88
13.5	1.86	2.20	2.46	1.81	2.09	2.30	1.75	1.98	2.14	1.72	1.91	2.05	1.68	1.83	1.93	1.65	1.77	1.86
14.0	1.82	2.17	2.43	1.76	2.06	2.28	1.71	1.95	2.12	1.67	1.88	2.03	1.64	1.80	1.91	1.61	1.74	1.83

Tabla 68. Factores de erosión – trabazón de agregados, bermas de concreto (eje simple, tándem y tridem)

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			30			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.46	3.49	3.50	3.42	3.39	3.38	3.38	3.32	3.30	3.36	3.29	3.25	3.32	3.26	3.21	3.28	3.24	3.16
4.5	3.32	3.39	3.40	3.28	3.28	3.28	3.24	3.19	3.18	3.22	3.16	3.13	3.19	3.12	3.08	3.15	3.09	3.04
5.0	3.20	3.30	3.32	3.16	3.18	3.19	3.12	3.09	3.08	3.10	3.05	3.03	3.07	3.00	2.97	3.04	2.97	2.93
5.5	3.10	3.22	3.26	3.05	3.10	3.11	3.01	3.00	3.00	2.99	2.95	2.94	2.96	2.90	2.87	2.93	2.86	2.83
6.0	3.00	3.15	3.20	2.95	3.02	3.05	2.90	2.92	2.92	2.88	2.87	2.86	2.86	2.81	2.79	2.83	2.77	2.74
6.5	2.91	3.08	3.41	2.86	2.96	2.99	2.81	2.85	2.86	2.79	2.79	2.79	2.76	2.73	2.72	2.74	2.68	2.67
7.0	2.83	3.02	3.09	2.77	2.90	2.94	2.73	2.78	2.80	2.70	2.72	2.73	2.68	2.66	2.65	2.65	2.61	2.60
7.5	2.76	2.97	3.05	2.70	2.84	2.89	2.65	2.72	2.75	2.62	2.66	2.67	2.60	2.59	2.59	2.57	2.54	2.54
8.0	2.69	2.92	3.01	2.63	2.79	2.84	2.57	2.67	2.70	2.55	2.61	2.62	2.52	2.53	2.54	2.50	2.48	2.48
8.5	2.63	2.88	2.97	2.56	2.74	2.80	2.51	2.62	2.65	2.48	2.55	2.58	2.45	2.48	2.49	2.43	2.43	2.43
9.0	2.57	2.83	2.94	2.50	2.70	2.77	2.44	2.57	2.61	2.42	2.51	2.53	2.39	2.43	2.44	2.36	2.38	2.38
9.5	2.51	2.79	2.91	2.44	2.65	2.73	2.38	2.53	2.58	2.36	2.46	2.49	2.33	2.38	2.40	2.30	2.33	2.34
10.0	2.46	2.75	2.88	2.39	2.61	2.70	2.33	2.49	2.54	2.30	2.42	2.46	2.27	2.34	2.36	2.24	2.28	2.29
10.5	2.41	2.72	2.85	2.33	2.58	2.67	2.27	2.45	2.51	2.24	2.38	2.42	2.21	2.30	2.32	2.19	2.24	2.26
11.0	2.36	2.68	2.83	2.28	2.54	2.65	2.22	2.41	2.48	2.19	2.34	2.39	2.16	2.26	2.29	2.14	2.20	2.22
11.5	2.32	2.65	2.80	2.24	2.51	2.62	2.17	2.38	2.45	2.14	2.31	2.36	2.11	2.22	2.26	2.09	2.16	2.19
12.0	2.28	2.62	2.78	2.19	2.48	2.59	2.13	2.34	2.43	2.10	2.27	2.33	2.06	2.19	2.23	2.04	2.13	2.16
12.5	2.24	2.59	2.76	2.15	2.45	2.57	2.09	2.31	2.40	2.05	2.24	2.31	2.02	2.15	2.20	1.99	2.10	2.13
13.0	2.20	2.56	2.74	2.11	2.42	2.55	2.04	2.28	2.38	2.01	2.21	2.28	1.98	2.12	2.17	1.95	2.06	2.10
13.5	2.16	2.53	2.72	2.08	2.39	2.53	2.00	2.25	2.35	1.97	2.18	2.26	1.93	2.09	2.15	1.91	2.03	2.07
14.0	2.13	2.51	2.70	2.04	2.36	2.51	1.97	2.23	2.33	1.93	2.15	2.24	1.89	2.06	2.12	1.87	2.00	2.05

**Figura 61. Repetición de carga admisible con base en el factor de erosión
(con bermas de concreto)**



Ejemplo resuelto

Diseñar el pavimento según el método PCA para una vía de de 2 sentidos y de dos carriles por sentido en la cual se espera tener una TPD inicial de 12900 vehículos de los cuales el 19% son comerciales. Se estima una tasa de crecimiento anual de 4% durante el periodo de diseño de 20 años. En la zona se realizo un pesaje de carga en el cual se obtuvo la información que se muestra en la siguiente tabla.

Datos sobre distribución de las cargas del transito		
(1) Carga por eje (kips)	(2) Ejes por cada 1000 vehículos comerciales	(3) Ejes por 1000 comerciales ajustado
Ejes simples		
30	0.28	0.58
28	0.65	1.35
26	1.33	2.77
26	2.84	5.92
24	4.72	9.83
22	10.40	21.67
20	13.56	28.24
18	18.64	38.83
16	25.89	53.94
14	81.05	168.85
Ejes tándem		
52	0.94	1.96
48	1.89	3.94
44	5.51	11.98
40	16.45	34.27
36	39.08	81.42
32	41.06	85.54
28	73.07	152.23

Se asume un factor de seguridad de carga de 1.2 el suelo de subrasante presenta un módulo de reacción $K=100 \text{ lb./pulg.}^3$ y se puede obtener un concreto con un módulo de rotura $MR=4.5 \text{ Mpa} = 650 \text{ lb./pulg.}^2$, y además el pavimento debe tener juntas con pasadores y sin bermas o bordillos en concreto.

Solución:

- a. Determinación de k de diseño: se usara una capa de subbase granular, con un espesor de 100 mm (4 plg.). Con el espesor de la subbase y el módulo de reacción de la subrasante 27 Mpa/m (100 lb./pulg.³) en la tabla 59. se obtiene un valor de k de diseño de 36 Mpa/m (130 lb./pulg.³).
- b. Determinar el número acumulado de vehículos en el carril de diseño y durante el periodo de diseño.

- TPD inicial =12900 vehículos.
- Transito promedio diario durante todo el periodo de diseño: con el valor de la tasa de crecimiento se entra a la tabla (61) para obtener el “factor de proyección” para los 20 años de periodo de diseño, el cual es igual a 1.5.

129000*1.5=19350 vehículos en las 2 direcciones.

Pero en una dirección seria: $\frac{19350}{2} = 9675$ vehículos en dos carriles

- c. Calculo del número de vehículos comerciales en el carril de diseño durante el periodo de diseño.(Para este paso se usa la gráfica 58 para ajustar el porcentaje de vehículos comerciales)

$$T \text{ acumulado} = 9675 * \frac{19}{100} * 0.81 * 3.65 * 20 = 10'880.000 \text{ vehículos comerciales}$$

- d. Los datos de carga por eje de la tabla adjunta al ejercicio son los datos que se colocan en la columna 1 del formato de la tabla 62, tanto para ejes simples como tándem.

- Asumir un espesor de losa de concreto de 9.5 pulg.
 - Determinar los esfuerzos equivalentes los cuales se colocan en las casillas 8 y 11 del formato (tabla 62) se sacan de la tablas (63) según corresponde al enunciado del problema. En las tablas 63, se entra con el módulo de tensión combinado (de la subrasante y la subbase) $K=130 \text{ lb/pulg.}^3$ y el espesor adoptado de las losas de concreto (9.5 pulg.) y se encuesta es de 206 para el caso de ejes sencillos y de 192 para eje tándem.
- e. Una vez obtenidos los esfuerzos equivalentes se determinan los factores de relación de esfuerzos y se colocan en las casillas 9 y 12 de la tabla 62.
- Para el caso de ejes sencillos el factor de relación de esfuerzos se obtiene mediante la relación entre el esfuerzo equivalente correspondiente y el módulo de rotura (MR) del concreto así:

$$\text{Casilla 9} = \frac{206}{650} = 0.317$$
 - Para el caso de ejes en tándem sería:

$$\text{Casilla 12} = \frac{192}{650} = 0.295$$
- f. Determinar los factores de erosión empleando las tablas (65) que son las que corresponden al ejemplo. En las tablas 66, se entra con el módulo de tensión combinado (de la subrasante y la subbase) $K=130 \text{ lb/pulg.}^3$ y el espesor adoptado de las losas de concreto (9.5 pulg.) y se encuesta que es de 2.59 para el caso de ejes sencillos y de 2.79 para eje tándem. Estos valores se colocan en las casillas 10 y 13 de la tabla 62.

- g. En la tabla de calculo 62, en la columna 2 se coloca el resultado de multiplicar cada una de las cargas por eje de la columna 1, por el factor de seguridad de carga (1.2). los valore de la columna 3, de acuerdo a los datos sobre la distribución de las cargas de transito, y se calcula así:

$$\text{Columna 3} = \frac{\left(\frac{\text{Numero de ejes por cada}}{1000 \text{ vehiculos comerciales}} \right) * \left(\text{Número esperado de V.C en el carril de diseño y durante el periodo de diseño (calculado paso c)} \right)}{1000}$$

Por ejemplo para los valores de la primera fila seria:

$$\text{Columna 3} = \frac{0.58 * 10'880.000}{1000} = 6310$$

h. Análisis de fatiga

- Calcular las repeticiones que admite el pavimento por fatiga (figura 59). En esta figura con los valores de las carga por ejes (sencillos y tándem) y el factor de relación de esfuerzos se determinan las repeticiones admisibles de carga que son los valores que aparecen en la columna 4. De la tabla 62.
- el cálculo del consumo de fatiga, se realiza dividiendo los valores de la columna 3 sobre los valores de la columna 4, y multiplicando esta relación por 100, los valores así obtenidos se colocan en la columna 5. la sumatoria total de esta columna da origen al consumo total de fatiga (62.9%).

i. Análisis de erosión

- Mediante la figuras 60, se determinan las repeticiones de carga admisibles, antes que el pavimento falle por problemas de erosión. Para

este caso se escogió la figura 60, ya que el pavimento no tiene berma de concreto, los valores obtenidos en esta figura se colocan en la columna 6.

- Los porcentajes de daño que corresponden a los valores de la columna 7 se determinan dividiendo cada uno de los valores de la columna 3 en los valores de la columna 6 y multiplicando por 100. La sumatoria de los porcentajes de daño de la columna 7, determina el daño total por erosión (38.7%).

Respuesta: El espesor de la losa escogido para tanteo se considera adecuado dado que los totales de fatiga y erosión son menores del 100%.

- *Losa de concreto de 9.5 pulg. (24.13 cm.)*
- *Subbase tratada con cemento de 100 mm (4 plg.)*

NOTA: El espesor de la losa escogido para el tanteo sería inadecuado si los totales de fatiga y erosión superan el 100%. En este caso tocaría hacer un nuevo tanteo con un espesor mayor. Si los totales son muy inferiores al 100% se debe hacer un nuevo tanteo con un espesor menor.

5.2. JUNTAS EN LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

El diseño de juntas en los pavimentos de concreto tiene como función del control del agrietamiento, así como de mantener la capacidad estructural del pavimento y su calidad de servicio en los más altos niveles al menor costo anual. Además las juntas tienen funciones más específicas, como lo son:

- El control del agrietamiento transversal y longitudinal provocado por las restricciones de contracción combinándose con los efectos de pandeo de las losas, así como las cargas del tráfico.

- Absorber los esfuerzos provocados por los movimientos de las losas.
- Proveer una adecuada transferencia de carga.
- Darle forma al depósito para el sellado de la junta.

Además se debe tener en cuenta que una construcción adecuada y a tiempo, así como un diseño apropiado de las juntas incluyendo un efectivo sellado, son elementos claves para el buen comportamiento del sistema de juntas.

5.2.1. Consideraciones para el diseño de juntas

Como ya se mencionó anteriormente la necesidad del sistema de juntas es el resultado del deseo de controlar el agrietamiento transversal y longitudinal. Este agrietamiento se presenta por la combinación de varios efectos, entre los que podemos mencionar la contracción por secado del concreto, los cambios de humedad y de temperatura, la aplicación de las cargas del tránsito, las restricciones de la subrasante ó terreno de apoyo y también por ciertas características de los materiales empleados. Para el diseño adecuado del sistema de juntas se debe evaluar las siguientes recomendaciones:

- ◆ **Consideraciones Ambientales:** Los cambios en la temperatura y en la humedad inducen movimientos de la losa, resultando en concentraciones de esfuerzos y en alabeos.
- ◆ **Espesor de losa:** El espesor del pavimento afecta los esfuerzos de alabeo y las deflexiones para la transferencia de carga.
- ◆ **Transferencia de carga:** La transferencia de carga es necesaria a lo largo de cualquier junta del pavimento, sin embargo la cantidad requerida de

transferencia de carga varía para cada tipo de junta. Cuando se empleen barras de amarre ó pasajuntas, además el tipo y el tamaño de las barras también influyen en el diseño de juntas.

- ◆ **Tráfico.** El tráfico es un factor extremadamente importante para el diseño de juntas. Su clasificación, canalización y la predominancia de cargas en el borde influyen en los requerimientos de transferencia de carga para el comportamiento a largo plazo.

- ◆ **Características del concreto:** Los componentes de los materiales afectan la resistencia del concreto y los requerimientos de las juntas. Los materiales seleccionados para el concreto determinan las contracciones de la losa, por ejemplo del agregado grueso influye en el coeficiente térmico del concreto, en adición a esto los agregados finos tienen una influencia perjudicial en el comportamiento de las juntas. En muchas ocasiones el despostillamiento es resultado de concentraciones de materiales malos a lo largo de las juntas.

- ◆ **Tipo de subrasante ó terreno de apoyo:** Los valores de soporte y las característica fricciones en la interfase del pavimento con el terreno de apoyo para diferentes tipos de suelos afectan los movimientos y el soporte de las losas.

- ◆ **Características del sellador:** El espaciamiento de las juntas influye en la selección del tipo de sellador. Otras consideraciones, tales como adecuados factores de forma y costos ciclos de vida también afecta la selección del sellador.

- ◆ **Apoyo lateral:** El tipo de acotamiento (de concreto y amarrado, de asfalto, de material granular) afecta el soporte de la orilla del pavimento y la habilidad de las juntas centrales para realizar la transferencia de carga.

- ◆ **Experiencia pasada:** Los datos locales del comportamiento de los pavimentos son una excelente fuente para establecer un diseño de juntas, sin embargo las mejoras a los diseños del pasado con la tecnología actual puede perfeccionar significativamente su comportamiento.

5.2.2. Tipos de juntas

Los tipos de juntas más comunes en los pavimentos de concreto son:

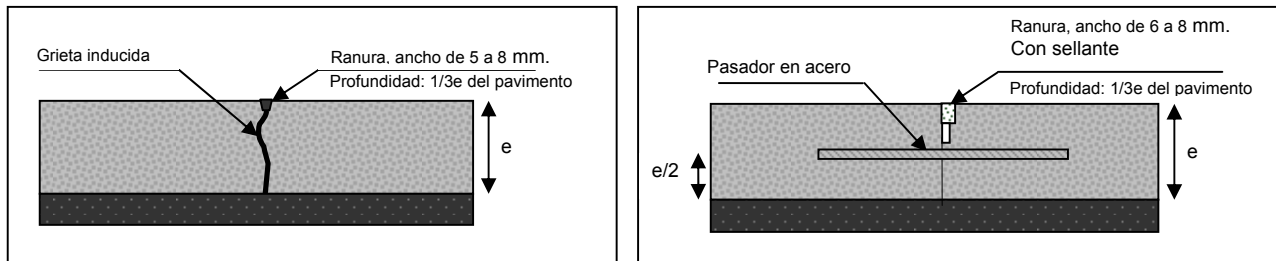
- ◆ **Juntas transversales:** Este tipo de juntas se hacen con el fin de evitar el agrietamiento debido al esfuerzo que se provoca por la contracción y alabeo de las losas; El espaciamiento se puede obtener por medio de la expresión de Alber Joisel que es la siguiente:

$$L = \frac{3P}{e^2} \quad \text{Ecuación (53)}$$

Donde:

- P : carga máxima (elástica) que puede presentarse en una losa (ton.)
- e : espesor mínimo de la losa (cm.)
- L : longitud máxima de la losa (m)

Figura 62. Juntas transversales con y sin pasajuntas



- ✓ **Juntas transversales de Contracción:** Son las juntas que son construidas transversalmente al eje central del pavimento y son espaciadas para controlar el agrietamiento provocado por los efectos de las contracciones producidos por los cambios de temperatura y de humedad.
- ✓ **Juntas Transversales de Construcción:** Son las juntas colocadas al final de un día de pavimentación ó por cualquier otra interrupción a los trabajos (por ejemplo los accesos a un puente).
- ✓ **Junta Transversal de Expansión/Aislamiento:** Las juntas de aislamiento y de expansión permiten que se presente mecanismos anticipados de movimientos verticales y horizontales entre un pavimento y otra estructura sin dañar al pavimento ó la estructura y dado que el comportamiento puede afectarse significativamente por el uso y la ubicación planeada de estas juntas, se deberá tener mucho cuidado en el proceso de diseño.
- ◆ **Juntas longitudinales:** estas juntas se construyen para controlar las fisuras que se pueden presentar en los pavimentos cuando se construyen con anchos superiores a 5 m. la transmisión de cargas se hace en estos

casos por trabazón de agregados y es usual colocar barras de anclaje que mantenga unidad las caras de las juntas y garanticen su eficiencia. Cuando se requiera el uso de barras de anclaje en este tipo de juntas, se diseñan para resistir la fuerza de tracción generado por la fricción entre la losa de pavimento y la subrasante. La sección transversal del acero por unidad de longitud de junta se puede calcular así:

$$A_s = \frac{bfw}{f_s} \quad \text{Ecuación (54)}$$

Donde:

- A_s : área de acero por unidad de longitud de junta (cm^2/m) sabe
- b : distancia entre la junta en consideración y el borde libre del pavimento (m)
- f : coeficiente de ficción entre losa y suelo (se toma generalmente 1.5)
- w : peso de la losa por unidad de área (kg/m^2)
- f_s : esfuerzo de trabajo del acero (kg/cm^2) normalmente se toma (0.67 f_y) siendo f_y el esfuerzo de cedencia del acero.

La longitud de las barras de anclaje deben ser tal que el esfuerzo de adherencia a cada lado de la junta iguale el esfuerzo de trabajo del acero. Adicionando 7.5 cm. para compensa defectos de colocación de la varilla, la longitud se puede calcular así:

$$L = \frac{2 * A * f_s}{a * p} \quad \text{Ecuación (55)}$$

Donde

- L : longitud total de la barra de anclaje (cm.)
- A : área transversal de una barra de anclaje (cm^2)

- f_s : esfuerzo de trabajo del acero (kg./cm^2) normalmente se toma $(0.67 f_y)$ siendo f_y el esfuerzo de cedencia del acero.
- a : esfuerzo de trabajo por adherencia. Para acero corrugado, se permite usar el 10% de l valor de resistencia a compresión del concreto; sin embargo, no debe exceder de 24.6 kg./cm^2
- p : perímetro de una varilla (cm.)

Figura 63. Junta longitudinal

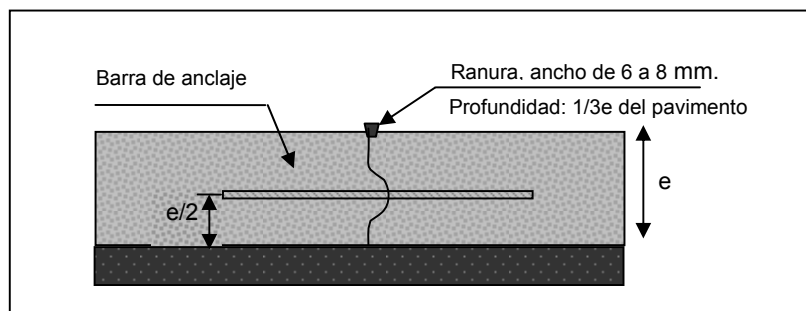
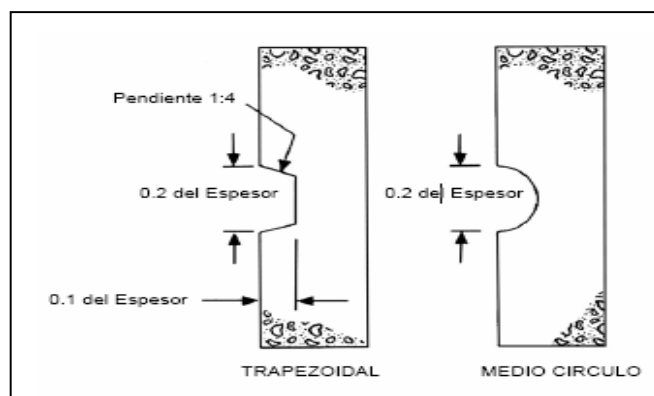
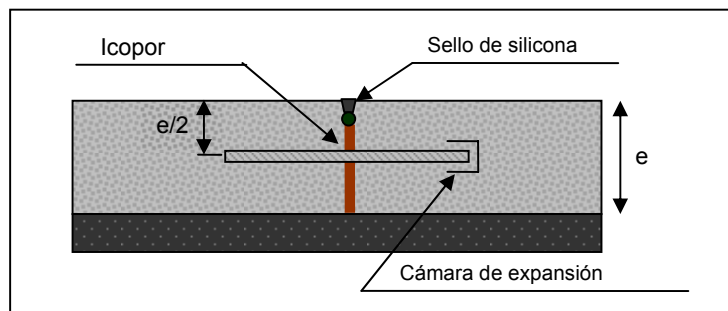


Figura 64. Secciones endientadas para juntas longitudinales



- ✓ **Junta Longitudinal de Contracción:** Son las juntas que dividen los carriles de tránsito y controlan el agrietamiento donde van a ser colados en una sola franja dos ó más carriles.
- ✓ **Junta Longitudinal de Construcción:** Estas juntas unen carriles adyacentes cuando van a ser pavimentados en tiempos diferentes.
- ◆ **Junta de dilatación:** Son juntas transversales ó longitudinales (pavimentos de vía ancha) que permitirán el movimiento de las losas, a través de un material compresible intermedio, si estas se dilatan por efecto de la temperatura, evitando los desplazamientos no deseables.

Figura 65. Junta de dilatación



5.2.3. Factores que contribuyen a la transferencia de carga.

- ◆ **Trabazón de agregados:** La trabazón de agregados depende de la resistencia al cortante entre las partículas del agregado en las caras de la junta, debajo del

corte inducido en la junta. Este sistema de transferencia de carga es más efectivo para pavimentos construidos con una corta separación de las juntas y bases estabilizadas no erosionables o bases permeables que experimenten bajos volúmenes de tráfico pesado. Para incrementar la trabazón de agregados y minimizar la diferencia de elevación en las juntas, se recomienda:

- Losas con espesores grandes, ya que una mayor área para trabazón de agregado provee una mejor transferencia de carga.
- Poca separación de juntas, menor a 4.5 metros.
- Bases rígidas (estabilizadas) con valores altos de módulo de reacción del suelo (k).
- Apoyo lateral mediante acotamientos de concreto.
- Subrasantes con suelos de agregado grueso (drenaje).
- Mejoras al drenaje, mediante drenes colectores y subrasantes permeables.

Para un medio ambiente con clima seco, árido y sin nieve las variaciones de temperatura y los movimientos de las juntas serán pequeñas por lo que la transferencia de carga a través de la trabazón de agregados puede comportarse bien siempre y cuando no se tengan muy altos volúmenes de tráfico pesado, sin embargo si se requerirá una corta separación de las juntas.

El agregado en sí es también importante para la transferencia de carga, por ejemplo sabemos que las grava triturada se comporta mejor que la no triturada debido a que éste provoca que las caras de las juntas sean más ásperas por lo que se desgastan menos que las caras redondeadas de los agregados no triturados. De la misma manera el agrietamiento inicial del concreto incrementa la aspereza de las caras de las juntas debido a que las grietas se forman alrededor del agregado en vez de a través de él.

En general se recomienda dejar la transferencia de carga únicamente a la trabazón de agregados para proyectos con menos de 5 millones de ejes sencillos equivalentes rígidos de 8.2 ton. ó con un tráfico inferior a los 80 ó 120 vehículos pesados diarios, ya que se ha encontrado con la experiencia que un tráfico mayor a este ya produce molestas fallas en las juntas, como lo son las diferencias de elevación, es decir que no empatan ambos lados de la junta.

- ◆ **Transferencia de carga mecánica (Pasajuntas).** La trabazón de agregados por sí sola no provee la suficiente transferencia de carga para un buen comportamiento a largo plazo en la mayoría de los pavimentos, principalmente en los proyectos de carreteras donde se tienen altos volúmenes de tráfico pesado. Por lo que se recomienda usar las barras pasajuntas y dejar la transferencia de carga en las juntas a medios mecánicos como lo son las barras pasajuntas en proyectos con un tráfico superior a los 120 vehículos pesados diarios ó más de 5 millones (Ejes Equivalentes Sencillos de 8.2 ton).

Las pasajuntas son barras de acero liso y redondo colocadas transversalmente a las juntas para transferir las cargas del tráfico sin restringir los movimientos horizontales de las juntas. Además mantienen a las losas alineadas horizontal y verticalmente. Dado que las pasajuntas llegan de un lado a otro de la junta.

Las pasajuntas reducen las deflexiones y los esfuerzos en las losas de concreto, así como el potencial de diferencias de elevación en las juntas, bombeo (expulsión de finos a través de las juntas) y rupturas en las esquinas. Por lo que toda esta reducción de deflexiones y esfuerzos en las losas al transmitir efectivamente la carga a lo largo de las juntas se traduce en un incremento en la vida de servicio del pavimento.

- ◆ **Bases estabilizadas.** Las bases estabilizadas reducen las deflexiones en las juntas, mejoran y mantienen la efectividad de la junta bajo la repetición de las

cargas del tráfico. Además son una muy estable y suave plataforma de apoyo para los trabajos de pavimentación.

5.2.4. Sellado de juntas

El propósito del sellado de las junta es minimizar la infiltración del agua superficial y materiales incompresibles al interior de la junta de pavimento y las capas subyacentes, los cuales podrían causar desportillamientos o algunos daños mayores. Por ejemplo la infiltración de agua al interior de la estructura de pavimento puede producir bombeo, que es la expulsión de material con agua a través de las juntas; mientras el agua es expulsada, se lleva partícula de grava, arena, arcilla, entre otros, ocasionando una progresiva pérdida de apoyo del pavimento y en el caso de los contaminantes incompresibles causan presiones de apoyo puntuales que pueden llevar a desportillamientos y desprendimientos, además al no permitir la expansión de las losas de concreto se puede presentar levantamiento de las losas en la zona de la junta.

Además otra función primordial de selladas las juntas, es para tener la capacidad de resistir las repeticiones de contracción y expansión producidas por el cambio de temperatura y humedad.

También es importante tener en cuenta que los sellantes de mejor calidad no funcionaran apropiadamente a menos que se utilicen correcta y cuidadosamente. Es necesario realizar el sellado de juntas bajo condiciones climáticas secas, en ningún caso con lluvia. Y se debe preparar la superficie antes de iniciar la colocación del sellante, para esto la junta debe estar limpia, seca, sin aceites y libre de toda otra suciedad, polvo, compuestos de curado, etc. Eliminar rastros de concreto suelto, piedras, triturados en polvo de las paredes de las juntas mediante escobillas de acero, ya que dichos materiales puede afectar la adherencia del

sellante con el concreto lo que reduce significativamente la efectividad del sellador.

En el caso de labores de conservación, resellado y reparaciones de juntas y grietas deben eliminarse todos los rastros de aplicaciones de sellantes anteriores. Utilizando equipos de aire comprimido, cepillos metálicos u otros procedimientos que aseguren paredes limpias previo a la aplicación del sello.

El INVIAS recomienda que para el sello de juntas se puede emplear: silicona o de aplicación en caliente.

Tabla 69. Requisitos para el material de sello de juntas en pavimento de concreto hidráulico

Propiedades	Norma de ensayo	Requisito
Esfuerzo de tensión a 150% de elongación (7 días de curado a 25°C ± 5°C, y 45% a 55% de humedad relativa).	ASTM D 412	310 kPa máximo
Flujo a 25°C ± 5°C	ASTM C 639 (15% Canal A)	No deberá fluir del canal.
Tasa de extrusión a 25°C ± 5°C	ASTM C 603 (1/8" a 50 psi)	75 – 250 gm/min.
Gravedad específica	ASTM D 792 (Método A)	1.01 a 1.51
Dureza a -18°C (7 días de curado a 25°C ± 5°C)	ASTM C 2240	10 a 15
Resistencia al intemperismo después de 5.000 horas de exposición continua.	ASTM C 793	Sin agrietamiento, pérdida de adherencia o superficies polvorientas por desintegración
Superficie seca a 25°C ± 5°C y 45% a 55% de humedad relativa	ASTM C 679	Menor de 75 minutos

Propiedades	Norma de ensayo	Requisito
Elongación a la rotura después de 21 días de curado a $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, y 45% a 55% de humedad relativa.	ASTM D 412	750 % mínimo
Fraguado al tacto a $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, y 45% a 55% de humedad relativa.	ASTM D 1640	Menos de 75 minutos
Vida en el contenedor a partir del día de embarque	-	6 meses mínimo
Adhesión a bloques de mortero.	AASHTO T 132	345 kPa mínimo
Capacidad de movimiento y adhesión. Extensión de 100% a 18°C después de 7 días de curado al aire a $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, seguido por 7 días en agua a $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.	ASTM C 719	Ninguna falla por adhesión o cohesión después de 5 ciclos.

Tirilla o cordón de Respaldo. La tirilla o cordón de respaldo es un componente muy importante en la instalación de los sellos líquidos, ya que impide que el sello líquido fluya hasta el fondo de la junta, evitando la adhesión del sello con el fondo del depósito de la junta, además la cintilla de respaldo sirve para definir el factor de forma y optimizar la cantidad de sellador empleado.

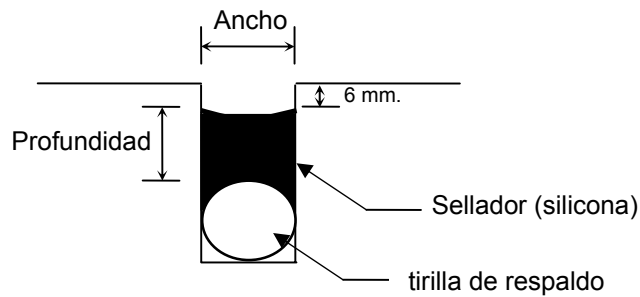
Se instalan en el depósito de la junta antes que se coloque el sello líquido, mediante una herramienta que presiona a la tirilla a la profundidad requerida para obtener el factor de forma deseado. La tirilla debe ser de espuma de polietileno extraída de celda cerrada y de diámetro aproximadamente de 25% mayor que el ancho de la caja de junta. Deberá cumplir con la especificación ASTM D 5249.

- ◆ **Depósito para el sello de la junta.** una variable a considerar es el cociente entre el ancho y la profundidad de la caja donde se depositara el sello de la junta, denominado Factor de Forma. El factor de forma es crítico para el buen comportamiento a largo plazo de un sellador. Debido a que la sección del sello de las juntas cambia durante la expansión y contracción del pavimento de

concreto, se desarrollan esfuerzos en el interior del sellador y a lo largo de la línea de unión del sellador con el depósito de la junta. Estos esfuerzos pueden ser excesivos si el factor de forma no es el apropiado para el material de sello.

La siguiente figura, muestra factores de forma comunes para sellos líquidos y para sellos a compresión. Un depósito para sello de junta con factor de forma igual ó menor a uno, desarrolla menos esfuerzos en el sellado de la junta que si tuviera un factor de forma superior a uno. El diseño del factor de forma incluye el tomar en cuenta que el depósito no se debe llenar a tope ó al nivel del pavimento, el sello se deberá hacer de 6 mm. antes del nivel del pavimento, con el objeto de evitar futuros problemas con la extrusión del sello.

Figura 66. Ejemplo del sello de una junta



$$\text{factor de forma} = \frac{\text{Ancho}}{\text{Profundidad}}$$

Ecuación (56)

6. MANTENIMIENTO DE LOS PAVIMENTOS

Las vías están sometidas a un desgaste continuo originado por diferentes factores como el tráfico, agentes climáticos, geotécnicos y la baja calidad de la construcción, entre otros. Si no se hacen las intervenciones adecuadas durante la vida útil del pavimento dicha degradación empezara a afectar diversos elementos como: Las velocidades de operación, los tiempos de viaje, además se aumentara los consumos de combustible y afectara las propiedades físicas y mecánicas de los vehículos. Por esta razón es indispensable implementar las acciones de conservación oportuna y eficazmente para así garantizar a los usuarios un nivel de servicio y seguridad adecuado.

Un programa de mantenimiento adecuado, puede contribuir a reducir la necesidad de tener que realizar la rehabilitación de las vías anticipadamente, los mantenimientos tienen como objetivo asegurar al menor costo posible, el funcionamiento adecuado de una vía o red vial, permitiendo costos razonables de operación de los vehículos y una mejor seguridad para cada uno de los usuarios. Algunos de los parámetros funcionales de un pavimento se pueden detectar simplemente por medios visuales, tal es el caso de los excesos de asfalto en la mezcla, los desprendimiento, etc., en tanto que otros como la respuesta dinámica del perfil del pavimento, la textura superficial, la resistencia al deslizamiento y los parámetros estructurales, pueden exigir el uso de algunos equipos especiales. Para obtener la información sobre el estado de una estructura de pavimento, a continuación se presentan algunos aspectos que se deben tener en cuenta:

- ✓ Inventario de daños
- ✓ Regularidad superficial del pavimento
- ✓ Resistencia al deslizamiento

- ✓ Auscultación estructural.

6.1. INVENTARIO DE DAÑOS

El inventario de daños es un paso indispensable para evaluar las condiciones globales de un pavimento. Esta información es la base para determinar la localización y extensión de los distintos deterioros que presenta una estructura de pavimento, con el propósito de poder establecer un juicio apropiado sobre sus condiciones. Para realizar el inventario de daños, a continuación se presentan algunas de las distintas patologías que muestran los pavimentos flexibles y rígidos.

6.1.1. Patologías de pavimentos flexible

Los posibles daños que pueden presentar los pavimentos se pueden clasificar en cuatro categorías.

- ❖ Fisuras
- ❖ Deformaciones
- ❖ Desprendimientos
- ❖ Daños superficiales
- ❖ Otros daños

❖ **Fisuras**

- **Fisuras longitudinales y transversales.** Son discontinuidades en el carpeta asfáltica, las cuales pueden presentarse en la misma dirección del transito o transversales a él. Este tipo de problema indica que posiblemente los esfuerzo de tensión en alguna de las capas de la estructura, han superado la resistencia del material afectado. Además la localizaron de las fisuras dentro del carril pueden ser un buen indicativo de la causa que las produjo, ya que aquellas que se encuentran en zonas donde son sometidas a carga pueden estar relacionadas con problemas de fatiga de toda la estructura o de algunas de sus partes.

Figura 67. Fisura longitudinal



Figura 68. Fisura transversal



◆ **Causas.** Las causas mas comunes de estos dos tipos de fisuras, pueden ser:

- ✓ Rigidización de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad debido a un exceso de filler, o al envejecimiento del asfalto.
- ✓ Reflexión de grietas de las capas inferiores, formadas en materiales estabilizados o por grietas o juntas existentes en placas de concreto hidráulico subyacentes.
- ✓ Además otras posibles causas en las fisuras longitudinales pueden ser: la fatiga de la estructura, que usualmente se exterioriza en las huellas del tránsito.
- ✓ Otra causa que son común para que se originen fisuras transversales son: la diferencia de rigidez de los materiales de subrasante, por ejemplo en la zona de contacto entre corte y terraplén, o en estructuras de pavimentos que no cuentan con el suficiente riego de liga o a las que no se les aplica y también cuando la capa de rodadura no tiene un espesor adecuado.

◆ **Niveles de severidad:**

- ✓ **Baja.** Abertura de la fisura menor que 1 mm., cerrada o con sello en buen estado.
- ✓ **Media.** Abertura de fisura de 1 mm. A 3 mm. Pueden presentar desportillamientos leves, además se puede presentar infiltración a través de este tipo de fisura
- ✓ **Alta:** abertura de fisura mayor de 3 mm. Pueden presentar desportillamientos considerables y afecta el tránsito de los vehículos, debido a que puede causar movimientos bruscos en los mismos.

Asimismo es importante tener en cuenta que las fisuras diagonales se consideran como fisuras transversales.

- **Fisuras en medialuna.** Estas fisuras presentan una forma parabólica que se asocia con un posible movimiento de la banca y por esta razón generalmente se presenta acompañada de hundimientos.

Figura 69. Fisura en medialuna.



- ◆ **Causas.** Este tipo de fisuras por lo general, se produce por inestabilidad de la banca o por efectos locales de desecación, pero además existen otras posibles causas como son:
 - ✓ Desecación debido a la presencia de árboles muy cerca del borde de la vía,
 - ✓ Ausencia o falla de obras de contención de la banca
 - ✓ Consolidación de los rellenos que acompañan las obras de contención.
 - ✓ Falla lateral del talud en zona de terraplén.

- ◆ **Niveles de severidad:** para este tipo de fisura se aplica el mismo criterio que para las fisuras longitudinales y transversales.

- **Fisura piel de cocodrilo:** Serie de fisuras interconectadas formando pequeños polígonos irregulares de ángulos agudos, El fisuramiento empieza en la parte inferior de las capas asfálticas, donde las tensiones y deformaciones por tracción alcanza su valor máximo, cuando el pavimento es solicitado por una carga. Las fisuras se propagan a la superficie, inicialmente, como una serie de fisuras longitudinales paralelas; luego por efecto de la repetición, evolucionan interconectándose y formando una malla cerrada, que asemeja la piel de un cocodrilo. Ocurren necesariamente en áreas sometidas al tránsito, como las huellas de canalización del tránsito. Además si la base y la subbase son débiles, el fisuramiento estará acompañado por ahuellamientos. En su etapa final, el agrietamiento se transforma en bache.

Figura 70. Fisura piel de cocodrilo



◆ **Causas.**

- ✓ Son causadas por la fatiga que sufre la capa asfáltica al ser sometidas a las cargas repetidas del tránsito. Por lo general, el fisuramiento indica que el pavimento ya no tiene capacidad estructural de sostener las cargas de tránsito y ha llegado al fin de su vida útil. El ligante por lo general ha envejecido y por ende ha perdido la flexibilidad de sostener cargas repetidas al tránsito sin agrietarse.

◆ **Niveles de severidad:** Se definen tres niveles de severidad

- ✓ **Bajo.** Fisuras muy finas, menores de 2 mm de ancho, paralelas con escasa interconexión, dando origen a polígonos de cierta longitud; los bordes de las fisuras no presentan despostillamiento.
 - ✓ **Mediano.** Fisuras finas a moderadas, de ancho menor a 5 mm, interconectadas formando polígonos pequeños y angulosos, que pueden presentar un moderado despostillamiento en correspondencia con las intersecciones.
 - ✓ **Alto.** La red de fisuras ha progresado de manera de constituir una malla cerrada de pequeños polígonos bien definidos, con despostillamientos de severidad moderada a alta, a lo largo de sus bordes; algunas de estas piezas pueden tener movimientos al ser sometidas al tránsito y/o pueden haber sido removidas por el mismo formando baches.
- **Fisuras en bloque.** Estas se presentan en la superficie del asfalto, constituyendo bloques de forma rectangular aproximadamente, este tipo de fisura se presenta en zonas no afectadas por el tránsito vehicular. Este deterioro se diferencia de la piel de cocodrilo, en que la piel de cocodrilo se presenta en áreas sometidas a cargas y además están formados por bloque con más lados y ángulos agudos que la fisura en bloque.

Figura 71. Fisuras en bloque



◆ **Causas.**

- ✓ Son causadas principalmente por la contracción de las mezclas asfálticas debido a las variaciones diarias de temperatura.
- ✓ También suelen ocurrir en pavimentos bituminosos colocados sobre bases granulares estabilizadas o mejoradas con cemento portland, que se producen a raíz de la contracción eventual de la capa estabilizada, que se reflejan en la superficie del pavimento.
- ✓ A menudo es difícil constatar si las fisuras y grietas son debido a contracciones producidas en la capa de rodadura o en la base y subbase.
- ✓ La ausencia de tráfico tiende a acelerar la formación de estas grietas de contracción.
- ✓ También se debe a cambios de volumen del agregado fino de las mezclas asfálticas con un ligante de penetración baja.
- ✓ Por lo general, el origen de estas fisuras no está asociado a las cargas de tráfico; sin embargo, dichas cargas incrementan la severidad de las fisuras.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo.** Existen algunas de las siguientes condiciones
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio a 2 mm con presencia de despostillamiento menor.
 - Fisuras selladas de cualquier ancho, con material de sello en condiciones satisfactorias que no permiten la filtración de agua
 - ✓ **Mediano.** Constan de algunas de las siguientes condiciones
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio entre 2 y 5 mm.
 - Fisuras sin sellar de ancho promedio menor de 5 mm con presencia de despostillamiento menor.
 - Fisura sellada de cualquier ancho, sin despostillamiento o cuando éste es breve, pero el material de sello esta en condiciones insatisfactorias.
 - ✓ **Alto.** Se presentan las siguientes condiciones:
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio a 5 mm.
 - Fisuras con presencia de despostillamientos severos.
- **Fisura por deslizamientos de capas.** Son fisuras con forma de semicírculo o medialunas, con curvaturas definidas de acuerdo con la fuerza de tracción que produce la llanta sobre el pavimento, cuando los vehículos arrancan o frenan. Este proceso conlleva a que la superficie del pavimento se deslice y se deforme. Además por lo general este tipo de fisuras se presentan en curvas, zonas montañosas o en intersecciones.

Figura 72. Fisura por deslizamientos de capas



◆ **Causas**

- ✓ Se producen cuando los efectos de frenado o giro de las ruedas de los vehículos provocan un resbalamiento y deformación de la superficie de pavimento. Esto ocurre generalmente cuando se combinan una mezcla asfáltica de baja estabilidad y una deficiente adherencia entre la superficie y la siguiente capa de la estructura del pavimento.
- ✓ La falta de riego de liga, un exceso de ligante o la presencia de polvo durante la ejecución de los riegos, son factores que con frecuencia conducen a tales fallas.
- ✓ Asimismo, espesores de carpeta muy reducidos sobre superficies pulidas, especialmente sobre pavimentos de concreto, suelen ser causas primarias en muchos casos.
- ✓ La causa también puede ser un contenido alto de arena en la mezcla, sea arena de río o finos triturados.

◆ **Niveles de severidad:** Se definen tres niveles de severidad

- ✓ **Bajo** Las fisuras son de ancho promedio inferior a 1 mm.
- ✓ **Mediano.** Existen algunas de las condiciones siguientes:
 - Las fisuras son de ancho promedio entre 1 a 3 mm.

- El área alrededor de las fisuras se encuentran fracturadas por las piezas que se encuentran bien ligadas y firmes aún.
 - ✓ **Alto.** Existen algunas de las condiciones siguientes:
 - Fisuras de ancho promedio mayor de 3 mm.
 - El área alrededor de las fisuras se encuentran fracturadas en trozos fácilmente removibles o que han desaparecido casi completamente.
- **Fisuras de borde.** Esta fisura se presenta con tendencia longitudinal a semicircular y esta localizada cerca del borde de la calzada.

Figura 73. Fisura de borde



◆ **Causas**

- ✓ Esta fisura se presenta principalmente por la falta de confinamiento lateral de la estructura debido a la ausencia de bermas o bordillos, anchos de bermas insuficientes o por la diferencia de nivel entre la berma y la calzada. Habitualmente estas fisuras se encuentran ubicadas entre 0.3 m y 0.6 m del borde de la calzada.

- **Fisuras en juntas de construcción.** Son fisuras longitudinales o transversales, que se producen por la mala ejecución de la junta de contracción de la carpeta asfáltica o de las juntas en zonas de ampliación. Se localizan generalmente en el eje de la vía.

Figura 74. Fisura longitudinal de construcción



Figura 75 . Fisura transversal en juntas de construcción



◆ **Causas**

- ✓ Carencia de ligante en las paredes de la junta
 - ✓ Deficiencia en el corte vertical de las franjas construidas con anterioridad
 - ✓ Deficiencia de compactación en la zona de la junta
 - ✓ Unión entre materiales de diferente rigidez
- **Fisuras por reflexión de la juntas.** Se presentan sólo en pavimentos mixtos constituidos por una superficie asfáltica sobre un pavimento de concreto con juntas. Consiste en la propagación ascendente hacia la superficie asfáltica, de las juntas del pavimento de concreto. Como consecuencia, por efecto de la reflexión, se observan en la superficie fisuras longitudinales o transversales que tienden a reproducir las juntas longitudinales y transversales de las losas inferiores.

Figura 76. Fisura por reflexión de la junta



◆ Causas

- ✓ Son causadas principalmente por el movimiento de las losas de concreto, como resultado de cambios de temperaturas o cambios en los contenidos de humedad.
- ✓ Las grietas por reflexión se propagan dentro de la capa asfáltica, como consecuencia directa de una concentración de tensiones; así mismo, si por la aplicación de las cargas de tránsito las losas experimentan deflexiones verticales importantes en las juntas, la reflexión se produce con mayor rapidez.
- ✓ El tránsito puede producir la rotura de la capa asfáltica en la proximidad de las fisuras reflejadas, resultando en peladuras y eventualmente baches

◆ Niveles de severidad

- ✓ **Bajo.** Existen algunas de las condiciones siguientes:
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio inferior a 5 mm sin descascaramiento o despostillamiento de sus bordes.
 - Fisuras selladas de cualquier ancho, con el material de sello en condición satisfactoria; no provocan golpeteo cuando se circula en vehículo sobre el pavimento.
- ✓ **Medio:** Existen algunas de las condiciones siguientes:
 - Fisuras sin sellar, de ancho promedio entre 5 y 15 mm.
 - Fisuras sin sellar, hasta 5 mm de ancho y selladas de cualquier ancho, que evidencien leve despostillamiento de sus bordes o están rodeadas por fisuras erráticas leves muy próximas.
 - La fisura provoca un significativo golpeteo al vehículo cuando se circula sobre el pavimento.
- ✓ **Alto.** Existen algunas de las condiciones siguientes:

- Cualquier fisura, sellada o no, rodeada por un moderado o severo agrietamiento de la superficie, o que evidencie rotura y desprendimiento de parte del material asfáltico en la proximidad de la misma.
- Fisuras sin sellar de ancho promedio mayor a 15 mm.
- La fisura provoca un severo golpeteo en el vehículo cuando se circula sobre el pavimento

❖ **Deformaciones**

- **Abultamiento.** Levantamiento localizado en la superficie del pavimento, generalmente con forma de una onda que distorsiona el perfil de la carretera.

Figura 77. Abultamiento



- ◆ **Causas.** Son causadas fundamentalmente por la expansión de los suelos de subrasante del tipo expansivo. En muchos casos pueden estar acompañadas por el fisuramiento de la superficie.

- ◆ **Niveles de severidad**
 - ✓ **Bajo:** Baja incidencia en la comodidad de manejo, apenas perceptible a la velocidad de operación promedio.
 - ✓ **Mediano:** Moderada incidencia en la comodidad de manejo, genera incomodidad y obliga a disminuir la velocidad de circulación.
 - ✓ **Alto:** Alta incidencia en la comodidad de manejo, condiciona la velocidad de circulación y produce una severa incomodidad con peligro para la circulación.

- **Hundimiento.** Depresión o descenso de la superficie del pavimento en un área localizada del mismo.

Figura 78. Hundimientos



- ◆ **Causas**

- ✓ Causados por asentamientos de la fundación
- ✓ Deficiencias constructivas (mala compactación de las capas interiores del pavimento, del terraplén o de la zona de acceso a la obra.
- ✓ Falta de mantenimiento de drenes
- ✓ Diferencia de rigidez de los materiales de la subrasante en los sectores de transición entre corte y terraplén.
- ✓ Circulación de tránsito muy pesado

◆ Niveles de severidad

Los niveles de severidad son los mismos que cuando se producen el abultamiento.

- **Ahuellamiento.** Depresión longitudinal continua a lo largo de la trayectoria de las llantas de los vehículos, a menudo se encuentra acompañada de una elevación de las áreas adyacentes a la zona deprimida y de fisurada. Un ahuellamiento significativo puede ocasionar una falla estructural.

Las repeticiones de las cargas de tránsito conducen a deformaciones permanentes en cualquiera de las capas del pavimento o en la subrasante. Cuando el radio de influencia de la zona ahuellada es pequeño, las deformaciones ocurren en las capas superiores del pavimento; cuando el radio de influencia es amplio, las deformaciones ocurren en la subrasante.

Las deformaciones resultan de una compactación o movimiento lateral de los materiales (fluencia plástica o punzonamiento por corte), ambos por efecto de tránsito. El ahuellamiento indica una insuficiencia estructural del pavimento o una deficiente estabilidad del sistema subrasante-pavimento.

Figura 79. Ahuellamientos



◆ **Causas**

- ✓ Consecuencia de pobre compactación
- ✓ Inestabilidad de bases o subbases granulares
- ✓ Mezcla asfáltica inestable
- ✓ Falta de apoyo lateral por erosión de berma
- ✓ Espesores deficientes
- ✓ Mala calidad de materiales o deficiente control de calidad
- ✓ Carga estática prolongada
- ✓ Exceso de ligante en riegos

- ◆ **Niveles de severidad.** La severidad del ahuellamiento se determina en función de la profundidad de la huella, midiendo ésta con una regla de 1.20 m de longitud colocada transversalmente al eje de la carretera; la medición se efectúa donde la profundidad es mayor, promediando los resultados obtenidos a intervalos de 3 m a lo largo de la huella. Se identifican tres niveles de severidad:

- ✓ **Bajo.** La profundidad promedio es menor de 10 mm.

- ✓ **Mediano.** La profundidad promedio es entre 10 y 25 mm.
 - ✓ **Alto.** La profundidad promedio es mayor de 25 mm.
- **Ondulación.** Este deterioro también se conoce como corrugación o rizado, es un daño caracterizado por la presencia de ondas en la superficie del pavimento, generalmente perpendiculares a la dirección del tránsito, con longitudes entre crestas usualmente menores que 1 m.

Figura 80. Ondulación



◆ **Causas**

- ✓ Las ondulaciones son deformaciones permanentes de la capa asfáltica, las cuales generalmente son causadas por la pérdida de estabilidad de la mezcla en climas cálidos, por mala dosificación de asfalto, uso de ligante blandos o agregados redondeados. Muchas veces este tipo de deterioro se presenta en zonas de frenado o acelerado de vehículos.

- ✓ La inadecuada ejecución del riego de liga o imprimación no permite una adecuada adherencia entre la capa asfáltica de rodadura y la subyacente, originando mayor posibilidad.
- ✓ También puede estar relacionado con un exceso de humedad en la subrasante, en cuyo caso el daño afecta toda la estructura de pavimento.
- ✓ Otra posible causante de las ondulaciones en un pavimento pueden ser la contaminación de la mezcla asfáltica con fino o materiales orgánicos.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Baja.** Profundidad máxima menor que 10 mm, causa poca vibración al vehículo, lo cual no genera incomodidad al conductor.
- ✓ **Media.** Profundidad entre 10 y 20 mm, causa mayor vibrado y empieza a generar incomodidad al vehículo.
- ✓ **Alta.** Profundidad máxima mayor de 20 mm, causa una vibración excesiva que puede generar un alto grado de incomodidad, haciendo necesario reducir la velocidad.

❖ **Desprendimientos**

- **Descascaramiento.** Este deterioro se produce al ocurrir desprendimiento de parte de la capa asfáltica superficial sin llegar a afectar las capas asfálticas subyacentes.

Figura 81. Descascaramiento



◆ **Causas**

- ✓ Limpiezas insuficientes previas al tratamiento superficial.
- ✓ Esparcimiento no homogéneo del ligante (asfalto).
- ✓ Ligante inadecuado.
- ✓ Dosificación árido (pétreo) – ligante (asfalto) inadecuada
- ✓ Colocación con lluvia o exceso de agua en la capa de apoyo, que produce delaminación.
- ✓ Compactación deficiente.
- ✓ Fraguado incompleto después de apertura al tránsito.
- ✓ Envejecimiento del ligante (asfalto).
- ✓ Mezcla asfáltica muy permeable.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Baja.** Profundidad menor a 10 mm,
- ✓ **Media.** Profundidad entre 10 y 25 mm,
- ✓ **Alta.** Profundidad máxima mayor de 25 mm,

- **Baches.** Es la desintegración total de la capa de rodadura y se puede extender a otras capas del pavimento, formando una cavidad de bordes profundos e irregulares.

Figura 82. Baches



- ◆ **Causas.** Los baches se producen por conjunción de varias causas:
 - ✓ Fundaciones y capas inferiores inestables.
 - ✓ Espesores insuficientes.
 - ✓ Defectos constructivos.
 - ✓ Retención de agua en zonas hundidas o fisuradas.
 - ✓ La acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento o fundación,
 - ✓ O sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras tipo piel de cocodrilo, que han alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento, originando un bache.
 - ✓ Subdrenaje inadecuado.

- ◆ **Niveles de severidad.** Se definen tres niveles de severidad (Bajo, Medio y Alto) en función del área afectada y de la profundidad del bache, de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 70. Nivel de severidad de los baches

Profundidad máxima (cm.)	Diámetro promedio del bache (cm.)		
	Menor a 70	70-100	Mayor a 100
Menor de 2.5	Bajo	Bajo	Medio
De 2.5 a 5	Bajo	Medio	Alto
Mayor de 5	Medio	Medio	Alto

- **Cabeza duras.** Este tipo de desprendimiento se caracteriza por la presencia de agregados expuestos fuera del mortero (arena-asfalto), que puede llegar a aumentar la rugosidad del pavimento, provocando ruido excesivo para el conductor.

Figura 83. Desprendimiento tipo cabeza dura.



◆ **Causas**

- ✓ Uso de agregados gruesos con tamaños inadecuados.
- ✓ Distribución granulométrica deficiente en el rango de las arenas.
- ✓ Diversidad en la dureza de los agregados.
- ✓ Separación de los agregados durante su manejo en obra.

❖ **Daños superficiales**

- **Exudación del asfalto (llorado).** La exudación del asfalto se caracteriza por la presencia de asfalto sin agregado (árido) en la superficie del pavimento, este deterioro hace que la superficie presente un aspecto brillante, resbaladizo y usualmente pegajoso, además este tipo de problema puede llegar a afectar la resistencia al deslizamiento del pavimento.

Figura 84. Exudación del asfalto



◆ **Causas.**

- ✓ Exceso de ligante (asfalto) en la dosificación
- ✓ Uso de ligante (asfalto) muy blando
- ✓ Derrame de solventes

◆ **Nivel de severidad**

- ✓ **Bajo.** La exudación se hace visible en la superficie, aunque en franjas aisladas y de espesor delgado que no cubre los agregados gruesos.
 - ✓ **Media.** Se presenta un exceso de asfalto libre que conforma una película que cubre parcialmente los agregados, con frecuencia se localizada en las huellas del tránsito; se vuelve pegajoso en los climas calidos.
 - ✓ **Alta.** En este nivel se presenta una cantidad significativa de asfalto en la superficie, la cual cubre en una gran parte los agregados, lo que le da un aspecto húmedo de intensa coloración negra y se torna pegajoso en los climas calidos.
- **Desgaste superficial.** Este tipo de deterioro es ocasionado primordialmente por las cargas producidas por los vehículos y agentes abrasivos o erosivos. Se caracteriza por la pérdida de ligante y mortero. Este daño contribuye al deterioro acelerado del pavimento por acción de los agentes climáticos.

Figura 85. Desgaste superficial.



◆ **Causas.**

- ✓ Este tipo de desgaste por lo general es un fenómeno natural de los pavimentos, pero si se presenta a edades tempranas y además con severidad media o alta, se podría deber a un endurecimiento significativo del asfalto.
- ✓ También puede ser falta de adherencia del asfalto con los agregados.
- ✓ Una deficiente dosificación de asfalto en la mezcla.
- ✓ Otra posible causa de este fenómeno puede ser la acción intensa del agua o cualquier otro agente abrasivo aparte del tránsito.

◆ **Niveles de severidad.**

- ✓ **Bajo.** En este nivel la superficie comienza a presentarse un poco áspera o rugosa, con irregularidades hasta de 3 mm. Aproximadamente.
- ✓ **Media.** Cuando la profundidad de las irregularidades están entre 3 y 10mm. Se pueden observar las partículas de agregado grueso y además cuando los vehículos transitan por las zonas afectadas, se presenta una vibración y una diferencia de sonido de las llanada al tránsito.

- ✓ **Alta.** Si ha empezado a producirse la desintegración de la capa de rodadura y se presenta desprendimientos evidentes y partículas sueltas sobre la calzada.

- **Surcos.** Deformación del perfil transversal, tanto por hundimiento a lo largo de las de la línea por la que transitan normalmente las ruedas de los vehículos, como por elevación de las áreas vecinas adyacentes a las rodadas. Las deformaciones presentan una configuración más amplia que las roderas.

Figura 86. Surcos



◆ **Causas.**

- ✓ Capacidad estructural del pavimento insuficiente
- ✓ Además puede producirse debido a la distribución transversal defectuosa del ligante bituminoso o del agregado, lo cual genera el desprendimiento de los agregados; en el concreto asfáltico, este proceso está íntimamente relacionado con la erosión producida por el agua en zonas de alta pendiente.

- **Perdida del agregado.** Este tipo de problema también se conoce como desintegración, se caracteriza por la desintegración superficial de la capa de rodadura, debido a la pérdida gradual de agregados, proporcionando de esta forma una superficie más rugosa, además debido a las cargas de tránsito y variaciones climáticas se va produciendo una exposición progresiva de los materiales de la estructura de pavimento.

Figura 87. Perdida de agregados



◆ **Causas.**

- ✓ La presencia de lluvia durante la aplicación o el fraguado del ligante asfáltico
- ✓ Por posible aplicación inadecuada del ligante en tratamientos superficiales.
- ✓ Utilización de agregados contaminados con finos o agregados muy absorbentes.
- ✓ Endurecimiento significativo del asfalto.

- ✓ Debido a la contaminación de la capa asfáltica con algún elemento como aceite, gasolina y otros.
- ✓ Problemas de adherencia entre los agregados y el ligante asfáltico.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo.** Los agregados de mayor tamaño empiezan a desprenderse y se observan pequeños huecos cuya separación es mayor de 0.15 m.
- ✓ **Medio.** Se produce mayor desprendimiento de material grueso y la separación es menor y oscila entre 0.05 y 0.15 m.
- ✓ **Alto.** Se presenta un desprendimiento excesivo de material fino y grueso con separaciones de 0.05 m, haciendo que la superficie sea más muy rugosa.

❖ **Otros**

- **Desintegración de bordes.** Consiste en la progresiva destrucción de los bordes del pavimento por la acción del tránsito. Se hace particularmente manifiesto en pistas con hombros no pavimentados, en las que existe una significativa cantidad de vehículos que acceden del hombro al pavimento o en el sentido contrario.

Figura 88. Desprendimiento de borde



◆ **Causas**

- ✓ La causa primaria es la acción localizada del tránsito, tanto por su efecto abrasivo como por el poder destructivo de las cargas, sobre el extremo del pavimento donde la debilidad de la estructura es mayor debido al menor confinamiento lateral, deficiente compactación del borde, etc.
- ✓ O también la presencia de arenas angulosas sueltas, muy próximas a la pista, hace que aumente la abrasión de las llantas que ascienden y descienden del pavimento, provocando peladuras severas que pueden conducir a la desintegración.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo.** Se observan fisuras paralelas al borde, de severidad baja o moderada, sin signos de peladuras, desintegración y canales de erosión.
- ✓ **Mediano.** Se observan fisuras paralelas al borde, de severidad alta, y peladuras de cualquier tipo, sin llegar a la rotura o desintegración total de los mismos.

- ✓ **Alto.** Se presenta una considerable desintegración total de los bordes, con importantes sectores removidos por el tránsito; el borde resulta serpenteante, reduciendo el ancho de la calzada.

- **Parcheo y reparaciones.** Un parche es un área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado, ya sea con material similar o diferente, para reparar el pavimento existente. También un parchado por reparación de servicios públicos es un parche que se ha ejecutado para permitir la instalación o mantenimiento de algún tipo de servicio público subterráneo.

El parcheo disminuyen el nivel de servicio de la carretera, al tiempo que puede constituir un indicador tanto de la intensidad de mantenimiento demandado por una carretera, como de la necesidad de reforzar la estructura de la misma. En general las áreas parchadas tienen un comportamiento inferior al pavimento original y en muchos casos son el origen de una mayor rugosidad del pavimento o de nuevas fallas en el mismo o en el área adyacente, particularmente cuando su ejecución es defectuosa.

Figura 89. Parcheo



◆ **Causas.** Las causas del deterioro propio del parche pueden establecerse por medio del tipo de daño que presente, los cuales pueden estar asociados principalmente con:

- ✓ Incrementos de los daños existentes en las áreas aledañas al parte.
- ✓ Juntas deficientes
- ✓ Procesos constructivos inadecuados

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo.** El parche se comporta satisfactoriamente, con muy poco o ningún deterioro.
- ✓ **Mediano.** El parche se encuentra moderadamente deteriorado; se evidencia un moderado deterioro alrededor de sus bordes.
- ✓ **Alto.** El parche está severamente dañado. La extensión o severidad de estos daños indican una condición de falla, siendo necesario el reemplazo del parche.

➤ **Afloramiento de agua.** Este daño se caracteriza por la presencia de agua en la superficie del asfalto, en momentos en los cuales no hay lluvia.

Figura 90. Afloramiento de agua.



◆ **Causas**

- ✓ Ausencia o inadecuado sistema de drenaje de la estructura de pavimentos, filtración de agua.
- **Corrimiento vertical de la berma.** Este tipo de problema se presenta por una diferencia de elevación entre la calzada y la berma, producida por el desplazamiento de la berma. Este deterioro del pavimento puede causar problemas internos a la estructura, debido a que se puede infiltrar el agua a través de esta deformación.

Figura 91. Corrimiento de la berma.



◆ **Causas**

- ✓ Esta se presenta por lo general cuando hay diferencia entre los materiales de la berma y la estructura de pavimento o por el bombeo de material de la base en la berma.
- ✓ Otro parámetro que podría producir este problema sería la inestabilidad de los taludes adyacentes.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo.** Se caracteriza por que el desplazamiento que se presenta es menor de 6 mm.
- ✓ **Medio.** El desplazamiento se encuentra entre 6 y 25 mm.
- ✓ **Alto.** Se presentan desplazamientos mayores a 25 mm.

6.1.2. Patologías de pavimentos rígidos

Los posibles daños que pueden presentar los pavimentos se pueden clasificar en cuatro categorías.

- ❖ Juntas
- ❖ Grietas
- ❖ Deterioros superficiales
- ❖ Deformaciones
- ❖ Otros deterioros

❖ Juntas

- **Deficiente del sellado.** Se considera que existe deficiencia del sellado, cuando se presenta un desprendimiento o rompimiento del sello de las juntas longitudinales o transversales, el cual permite la incrustación de materiales incompresibles (piedras, arenas, entre otros) y la infiltración de una cantidad considerable de agua superficial. Además se considera como deterioro del sello cualquiera de los siguientes defectos: endurecimiento, despegado de una o ambas paredes, fluencia fuera de la caja, carencia total, incrustación de materias ajenas y crecimiento de vegetación.

Figura 92. Deficiencia en el material de sello



◆ Causas

- ✓ Endurecimiento por oxidación del material de sello.
- ✓ Pérdida de adherencia con los bordes de las losas.
- ✓ Levantamiento del material de sello por efecto del tránsito y movimientos de las losas.

- ✓ Escasez o ausencia del material de sello
- ✓ Material de sello inadecuado
- ✓ Endurecimiento: Puede ser causado por el uso de producto de mala calidad, envejecimiento.
- ✓ Despegado de las paredes de la junta: Se origina por producto de mala calidad, sellado mal colocado, caja mal diseñada.
- ✓ Fluencia fuera de la caja: Se presenta por exceso de sello, producto de mala calidad, procedimiento de colocación deficiente.
- ✓ Carencia: Producto de mala calidad, procedimiento de colocación deficiente.
- ✓ Incrustaciones de materias incompresibles: bermas no pavimentadas, vehículos que dejan caer materiales.
- ✓ Crecimiento de vegetación: Es producido debido al alto contenido de humedad en las juntas.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Baja:** longitud con deficiencias de sellado < 5% de la longitud de la junta y no existe riesgo de entrada de agua y material incompresible.
- ✓ **Media:** Longitud con deficiencias de sellado entre 5 y 25 % de la longitud de la junta y el resto del material sellante se encuentra en condiciones no muy buenas.
- ✓ **Alta:** longitud con deficiencias de sellado > 25% de la longitud de la junta y entra material incompresible y agua, además es indispensable que el cambio y resellado se haga inmediatamente.

- **Separación de juntas longitudinales:** Son abertura en las juntas longitudinales del pavimento

Figura 93. Separación de juntas longitudinales



- ◆ **Causas:** Las principales causas de la separación de juntas transversales son:
 - ✓ Contracción o expansión diferencial de las losas debido a la falta de barras de anclaje entre carriles.
 - ✓ Asentamientos diferenciales de la subrasante
 - ✓ Por la falta de bermas
 - ✓ Desplazamiento lateral de las losa ocasionado por un asentamiento diferencial de la subrasante

- ◆ **Niveles de severidad**
 - ✓ **Bajo:** ancho de la separación < 3 mm. Y sin deformaciones perceptibles de la sección transversal.
 - ✓ **Medio:** separación entre 3 y 20 mm. Y la deformación de la sección transversal no implica riesgos para la seguridad del usuario.
 - ✓ **Alto:** ancho de separación >20 mm. Además se puede presentar diferencias de nivel entre losas adyacentes mayores de 10 mm. Esta separación ya ocasiona riesgos para la seguridad del usuario.

- **Desportillamientos de juntas.** Este tipo de deterioro se caracteriza por la desintegración de las aristas de las junta longitudinales ò transversales, con perdidas de fragmentos.

Figura 94. Desportillamientos de juntas



◆ **Causas**

- ✓ Mal procedimiento en el corte de las juntas
- ✓ Cuando se aplican cargas al pavimento antes de conseguir la resistencia mínima recomendada para el concreto.
- ✓ Por posibles debilidades de los bordes de las juntas debido procesos constructivos inadecuados.
- ✓ Uso de materiales de mala calidad, lo que ocasiona una desintegración del concreto.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo.** Este nivel se caracteriza por la presencia de pequeños fracturamientos, que no se extienden más de 80 mm. A cada lado de la junta. Dan lugar a pequeñas piezas que se mantienen firmes, pero ocasionalmente pueden faltar pequeñas fragmentos.
- ✓ **Medio.** La fractura se extiende a lo largo de la junta en más de 80 mm. a cada lado de la misma, en este nivel los fragmentos pueden estar sueltos y removerse algunas o todas las piezas, pero su profundidad es menor a 25 mm.
- ✓ **Alto.** La fractura se extiende a lo largo de la junta en más de 80 mm. a cada lado de la misma, en este nivel los fragmentos han sido movidos en su totalidad por el transito y su profundidad es mayor 25 mm.

❖ Grietas

- **Grietas de esquina:** Este tipo de deterioro se caracteriza por que se genera un bloque de forma triangular en la losa, debido al la intercepción de las juntas transversales y longitudinales, describiendo un ángulo mayor de 45° , con respecto a la dirección del transito. La longitud de los lados del triangulo sobre la junta de la losa varia entre 0.3 m y la mitad del ancho de la losa. Además las fisuras de esquina se extienden verticalmente a través de todo el espesor de la losa y este tipo de fisura se puede presentar tanto en concreto simple como en placas de concreto reforzado.

Figura 95. Grieta de esquina.



◆ **Causas.**

- ✓ Son causadas por la repetición de cargas pesadas (fatiga de concreto) combinadas con la acción drenante, que debilita y erosiona el apoyo de la fundación.
- ✓ Así como también por una deficiente transferencia de cargas a través de la junta, que favorece el que se produzcan altas deflexiones de esquina.
- ✓ Por falta de apoyo de la losa originado por la erosión de la base.

◆ **Nivel de severidad**

- ✓ **Bajo:** Grietas selladas o con abertura < 3 mm. Escalonamiento imperceptible y el bloque de la esquina esta completo.
- ✓ **Mediano:** Abertura entre 3 y 10 mm.
- ✓ **Alto:** Abertura >10 mm. Se presenta escalonamiento y el bloque de la esquina esta dividido en varias partes.

- **Grietas longitudinales:** Son grietas que se generan paralelas al eje de la vía o que van de una junta transversal al borde de la losa, intersectándose con ella a una longitud mayor que la mitad del ancho de la losa.

Figura 96. Grieta longitudinal



◆ **Causas**

- ✓ Son causadas por la repetición de cargas pesadas.
- ✓ Pérdida de soporte de la fundación.
- ✓ Alabeo térmico, originados por cambios de temperatura y humedad.
- ✓ Con frecuencia la ausencia de juntas longitudinales
- ✓ Cuando las losas presentan una relación ancho / longitud excesiva, conducen también al desarrollo de grietas longitudinales.
- ✓ Asentamiento de base o subrasante.
- ✓ Mal posicionamiento de las dovelas o barras de anclaje.
- ✓ Contracción del concreto.

◆ **Nivel de severidad.**

- ✓ **Bajo:** ancho <3 mm. Sin saltaduras y escalonamientos imperceptibles.
- ✓ **Medio:** ancho de grieta entre 3 y 10 mm. Con saltadura de ancho < 50 mm. Y escalonamiento <15 mm.
- ✓ **Alto:** Ancho >10 mm. Saltaduras de ancho \geq 50 mm. O escalonamiento \geq 15 mm.

- **Grietas transversales:** Son grietas que se generan perpendicularmente al eje de la vía. Pueden desarrollarse desde la junta transversal a la longitudinal, siempre que la intersección con la junta transversal este a una distancia mayor que la mitad del ancho de la losa y la intersección con la junta longitudinal se encuentre a una distancia inferior a la mitad del largo de la losa.

Figura 97. Grieta transversal



◆ **Causas**

- ✓ Son causadas por excesivas repeticiones de cargas pesadas (fatiga).

- ✓ Deficiente apoyo de las losas.
- ✓ Asentamientos de la fundación.
- ✓ Excesiva relación longitud / ancho de la losa o deficiencias en la ejecución de éstas.
- ✓ La ausencia de juntas transversales o bien losas con una relación longitud / ancho excesivos, conducen a grietas transversales.
- ✓ Variaciones significativas en el espesor de las losas.
- ✓ Problemas de drenajes.
- ✓ Espesor de losa insuficiente para soportar las sollicitaciones de carga.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Baja:** Ancho < 3 mm. Sin saltaduras y escalonamiento imperceptible.
 - ✓ **Medio.** Ancho de grieta entre 3 y 6 mm. Con saltaduras de ancho <50 mm. Ó escalonamiento < 6 mm.
 - ✓ **Alto:** Ancho > de 6 mm. Ó saltadura de ancho \geq 50 mm. Ó escalonamiento \geq 6 mm.
- **Grieta en bloque o fracción múltiple:** Fracturamiento de la losa de concreto conformando una malla amplia, combinando fisuras longitudinales, transversales y/o diagonales, subdividiendo la losa en bloques.

Figura 98. Grieta en bloque o fracción múltiple



◆ **Causas**

- ✓ Fatiga del concreto, debido a la repetición de cargas pesadas.
- ✓ Deficiente soporte de la fundación, que se traducen en una capacidad de soporte deficiente de la losa.
- ✓ Diseño de la estructura inadecuado.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo:** Grietas selladas o con aberturas < 3 mm. Escalonamiento imperceptible.
 - ✓ **Medio:** Abertura de grietas entre 3 y 10 mm.
 - ✓ **Alto:** Aberturas >10 mm. Se presenta escalonamiento >6 mm.
- **Grietas en pozos y sumideros.** Este tipo de grietas se presentan como una clasificación independiente, ya que están relacionadas directamente con la presencia de pozos o de sumidero.

Figura 99. Grieta en pozo y sumideros



◆ **Causas**

- ✓ Este tipo de grieta se produce por la variación de los esfuerzos debido a la presencia de pozos o sumideros, ya que esta zona se vuelve vulnerable a la presencia de grietas derivadas de la geometría irregular de la zona adyacente al pozo que no permite una buena distribución de esfuerzos.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo:** Abertura < 3 mm. Escalonamiento imperceptible.
- ✓ **Medio:** Abertura entre 3 y 10 mm.
- ✓ **Alto:** Abertura >10 mm. Y además se presenta escalonamiento mucho > 6 mm.

❖ Deterioros Superficiales

- **Desintegración.** Este tipo de problema se presenta debido a la pérdida continua de agregado grueso en la superficie, provocado por la progresiva desintegración de la superficie del pavimento por pérdida de material fino desprendido de la matriz arena-cemento del concreto, provocando de esta manera una superficie en la cual el agregado grueso está al descubierto, fácilmente perceptible a la vista y además con pequeñas cavidades.

Figura 100. Desintegración



◆ **Causas**

- ✓ Es causado por el efecto abrasivo del tránsito sobre concretos de calidad pobre.
- ✓ Uso de concretos con dosificaciones inadecuadas por ejemplo (bajo contenido de cemento, exceso de agua o granulometría de los agregados inadecuadas)
- ✓ Otro posible causa podría ser la incorrecta ejecución del pavimento en la cual podrían intervenir algunos de los siguientes factores como

(segregación de la mezcla, insuficiente densificación, curados defectuosos)

- ✓ Hormigón mal dosificado.
- ✓ Deficiente calidad de los materiales
- ✓ Reparaciones echas sin seguir recomendaciones técnicas.

◆ **Nivel de severidad**

- ✓ **Bajo:** Pequeños desprendimientos muy superficiales, puntuales o concentrados en áreas pequeñas.
 - ✓ **Medio:** peladuras generalizadas, proporciona una superficie con una textura abierta y el desprendimiento se limita solo a material fino, solamente superficialmente.
 - ✓ **Alto:** peladura generalizada, da lugar a una superficie rugosa, con desprendimiento de agregado grueso, las cuales dan lugar a la formación de cavidades o pequeños baches superficiales.
- **Descascaramiento.** Es la rotura de la superficie de la losa hasta una profundidad del orden de 5 a 15 mm, por desprendimiento de pequeños trozos de concreto.

Figura 101. Descascaramiento.



◆ **Causas.**

- ✓ Los descascaramientos son consecuencia de un exceso de acabado del concreto fresco colocado, produciendo la exudación del mortero y agua, provocando de esta manera que la superficie del concreto resulte muy débil frente a la retracción.
- ✓ También pueden observarse manifestaciones de descascaramiento en pavimentos de concreto armado, cuando las armaduras se colocan muy próximas a la superficie.

◆ **Niveles de severidad.**

- ✓ **Bajo.** Se presenta pérdida de material superficial a una profundidad menor a 5 mm.
 - ✓ **Medio.** Pérdida de material superficial a una profundidad entre 5 y 15 mm.
 - ✓ **Alta.** Este ocurre cuando la pérdida de material superficial se produce a profundidades >15 mm.
- **Baches.** Descomposición o desintegración la losa de concreto y su remoción en una cierta área, formando una cavidad de bordes irregulares, la cual en algunos casos puede dejar expuesto el material de la base. Su diámetro varía de 25 a 100 mm. y la profundidad puede ser mayor a 15 mm.

Figura 102. Bache.



◆ **Causas.**

- ✓ Mortero poco homogéneo
- ✓ Fundaciones y capas inferiores inestables.
- ✓ Espesores del pavimento estructuralmente insuficientes.
- ✓ Defectos constructivos.
- ✓ Retención de agua en zonas hundidas y fisuradas.
- ✓ La acción abrasiva del tránsito sobre sectores localizados de mayor debilidad del pavimento o sobre áreas en las que se han desarrollado fisuras en bloque, que han alcanzado un alto nivel de severidad, provoca la desintegración y posterior remoción de parte de la superficie del pavimento, originando un bache.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo:** La profundidad del bache es menor o igual a 25 mm.
- ✓ **Medio:** La profundidad entre 25 y 50 mm.
- ✓ **Alto:** Profundidad de afectación mayor a 50 mm.

- **Pulimiento.** Este tipo de deterioro se identifica por presentar una superficie de rodamiento excesivamente lisa por efecto del pulimiento de los agregados que la componen, ocasionando de esta forma la pérdida de fricción entre la superficie del pavimento y los neumáticos.

Figura 103. Pulimiento.



◆ **Causas**

- ✓ Esta deficiencia es causada principalmente por el tránsito, debido a que este, produce el desgaste superficial de los agregados de naturaleza degradable, particularmente cuando el concreto es de calidad pobre y favorece la exposición de los mismos.
- ✓ Cuando el agregado en la superficie llega a ser muy suave al tacto, la adherencia con las llantas de los vehículos se reduce considerablemente. La reducción de la fricción o resistencia al

deslizamiento, puede alcanzar niveles de riesgo para la seguridad del tránsito.

- ◆ **Niveles de severidad.** No se puede definir nivel de severidad, pero el pulimiento de los agregados puede ser considerado importante cuando al realizar un examen visual, este revela que la rugosidad sobre la superficie es muy reducida y se presenta una superficie suave al tacto.

- **Deterioro en los Parches:** Un parche es un área donde el pavimento original ha sido removido y reemplazado, ya sea con un material similar o eventualmente diferente, para reparar el pavimento existente, también un parchado por reparación de servicios públicos es un parche que se efectúa para permitir la instalación o mantenimiento de algún tipo de servicio público subterráneo.

Los parchados disminuyen la capacidad de servicio de la pista, al tiempo que pueden ser indicadores, tanto de la intensidad de mantenimiento demandado por una carretera, como la necesidad de reforzar la estructura de la misma. En muchos casos, los parchados, por deficiente ejecución dan origen a nuevas fallas.

Figura 104. Parches



- ◆ **Causas.** Las principales causas en el deterioro de un parche son:
 - ✓ En el caso de parches asfálticos, las posibles causas de su deterioro pueden ser: la capacidad estructural del parche es insuficiente o se realizó un proceso constructivo inadecuado.
 - ✓ En parches de concreto de pequeñas dimensiones, la retracción por fraguado puede separar el parche del concreto antiguo, si no se utiliza un epóxico como material de adherencia.
 - ✓ Además al usar parches de concreto, si se realizó el reemplazo de la mitad de una losa de concreto, el traspaso de carga entre el parche y la losa es insuficiente por falta de dovelas o barras de amarre y por defectos en el proceso constructivo.

- ◆ **Nivel de severidad**

- ✓ **Bajo:** en este nivel el parche se encuentra en excelentes condiciones y se desempeña muy bien.
- ✓ **Medio:** el parche presenta daños menores y presenta deficiencia en los bordes.
- ✓ **Alto:** el parche esta gravemente deteriorado, presenta daños de alta severidad y debe ser reparado lo más pronto posible.

❖ Deformaciones

- **Levantamiento de losa.** Es el levantamiento de la losa, localizado a ambos lados de una junta transversal o grieta. La parte que se realza frecuentemente se fracciona en varios segmentos.

Figura 105. Levantamiento de losa.



◆ **Causas.**

- ✓ Este levantamiento se debe a variaciones térmicas cuando la longitud de las losas es excesivas y no cuenta con juntas de expansión.
 - ✓ Por la presencia de suelos expansivos a poca profundidad.
 - ✓ Otra posible causa de este deterioro podría ser la mala colocación de las varillas de transmisión de carga.
 - ✓ Son causadas por falta de libertad de expansión de las losas de concreto, y estos levantamientos suelen ocurrir con mayor frecuencia en la proximidad de las juntas transversales. La restricción a la expansión de las losas puede originar fuerzas de compresión considerables sobre el plano de la junta. Cuando estas fuerzas no son completamente perpendiculares al plano de la junta o son excéntricas a la sección de la misma, pueden ocasionar el levantamiento de las losas contiguas a las juntas, acompañados generalmente por la rotura de estas losas.
- ◆ **Niveles de severidad:** el nivel de severidad para este tipo de deterioro se mide de acuerdo a la pérdida de serviciabilidad y en especial al riesgo que puede llegar a ser para los vehículos que transitan estas vías.
- ✓ **Bajo:** Baja incidencia en la comodidad de manejo, apenas es perceptible a velocidades de operación. Elevación entre bordes de las losas menor a 5 mm.
 - ✓ **Medio:** Moderada incidencia en la comodidad de manejo, ya se genera un poco de incomodidad a los usuarios y obliga a la disminución de la velocidad. Elevación entre bordes de las losas menores de 10 mm.
 - ✓ **Alto:** El levantamiento causa un excesivo salto del vehículo, una gran incomodidad al usuario, además se presenta un alto riesgo para la seguridad de las personas y posibles daños a los vehículos. Separación entre bordes de las losas mayores a 10 mm.

- **Escalonamiento de juntas y grietas:** Es el desnivel entre dos superficies del pavimento, separados por una junta transversal o grieta.

Figura 106. Escalonamiento de juntas y grietas



◆ **Causas**

- ✓ Se produce por la deficiencia en la transferencia de cargas de las losas.
- ✓ Por erosión de la base de las juntas.
- ✓ También pueden ser ocasionados por un mal sistema de drenaje de la estructura de pavimento.
- ✓ Por asentamientos diferenciales de la subrasante.
- ✓ O por falta de capacidad de la subrasante.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo:** desnivel < 5 mm.
- ✓ **Medio:** desnivel entre 5 y 10 mm.

- ✓ **Alto:** desnivel >10 mm.

- **Hundimientos:** Depresión o descenso de la superficie del pavimento en un área localizada del mismo; puede estar acompañado de un fisuramiento significativo, debido al asentamiento de la losa del pavimento.

Figura 107. Hundimiento



◆ **Causas**

- ✓ Este tipo de deformación permanente del pavimento, con o sin agrietamiento puede ocurrir cuando se producen asentamiento o consolidación en la subrasante, por ejemplo, en zonas contiguas a una estructura de drenaje o de retención donde puede ocurrir el asentamiento del material de relleno por deficiente compactación inicial o bien por movimiento de la propia estructura.
- ✓ También pueden ser originadas por deficiencias durante el proceso de construcción de las losas.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo:** El hundimiento causa al vehículo un balanceo o salto característico, sin generar incomodidad. Profundidad < a 20 mm.
- ✓ **Mediano:** El hundimiento causa a los vehículos un significativo salto o balanceo, que genera incomodidad. Profundidad entre 20 y 40 mm.
- ✓ **Alto:** El hundimiento causa un excesivo salto que provoca una pérdida de control de los vehículos, siendo necesario recurrir a una reducción de velocidad. Profundidad > a 40 mm.

❖ **Otros tipos de deterioros**

- **Descenso de la berma:** Este deterioro se caracteriza por la presencia de una diferencia de altura entre el borde externo del pavimento y la berma.

Figura 108. Descenso de la berma.



◆ **Causas**

- ✓ En zonas de clima frío, con ciclos de hielo y deshielo, se produce descompactación debido a la penetración del hielo en el suelo.
- ✓ Por asentamientos de la berma, ocasionados por insuficiente compactación.
- ✓ Cuando las bermas no están revestidas, la capa superior de estas pueden ser erosionadas por el agua que escurre desde el pavimento hacia el borde externo de la losa.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Bajo:** se caracteriza por que la diferencia de altura entre la losa y la berma es menor a 10 mm.
 - ✓ **Medio:** la diferencia de altura entre la losa y la berma se encuentra entre 10 y 30 mm.
 - ✓ **Alto:** la diferencia de altura entre la losa y la berma es mayor a 30 mm.
- **Separación entre la berma y el pavimento:** Esto ocurre cuando se incrementa la abertura de la junta longitudinal entre la berma y el pavimento.

Figura 109. Separación entre la berma y el pavimento



◆ **Causas**

- ✓ Puede presentarse por el escurrimiento de agua sobre la berma cuando existe desnivel entre ella y el pavimento.
- ✓ Por asentamientos con desplazamiento por falta de compactación en la cara lateral del pavimento.

- ◆ **Nivel de severidad:** Este tipo de deterioro no se clasifica por niveles de severidad, pero en zonas donde la precipitación anual es superior a 50 mm. Debe considerarse de alta severidad cualquier separación que permita el ingreso de agua hacia la base.

- **Bombeo de finos sobre las juntas transversales y longitudinales:** se identifica por la expulsión de finos en presencia de agua a través de las juntas o fisuras, este bombeo se presenta por la deflexión que causan las cargas de tránsito a la losa de pavimento. Al expulsar partículas de grava, arena, arcilla o limos junto con el agua, puede generar una pérdida de soporte de las losas de

concreto. Este problema se puede hacer notar por la presencia de material fino en las juntas y grietas de la losa o sobre la superficie del pavimento.

Figura 110. Bombeo de finos sobre las juntas transversales y longitudinales



◆ **Causas**

- ✓ este deterioro se presenta debido a la succión que generan los vehículos pesados cuando hay agua entre la base y el pavimento.
- ✓ por la inadecuada transmisión de cargas entre las losas.

◆ **Niveles de severidad:** Cuando el fenómeno se manifiesta sin dejar un pozo o bache no pueden aplicarse niveles de severidad. pero en el caso contrario la severidad de los pozos o baches es la siguiente:

- ✓ **Baja:** cavidad entre pavimento y berma < 50 mm.
- ✓ **Media:** cavidad entre pavimento y berma entre 50 y 150 mm.
- ✓ **Alta:** cavidad entre pavimento y berma > 150 mm.

- **Fisuras ligeras de aparición temprana:** Son fisuras que solamente afectan la superficie de la losa, son aproximadamente de 0.2 m a 1 m de longitud, por lo general se presentan de forma paralela entre si o también pueden aparecer con un ángulo de 45 grados con el eje de la vía.

Figura 111. Fisuras ligeras de aparición temprana



◆ **Causas**

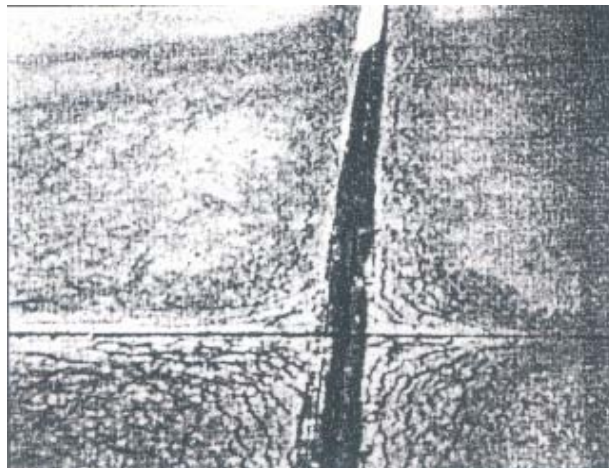
- ✓ Estas se presentan generalmente por contracción plástica del concreto, que aparecen antes del fraguado final, por secado prematuro.

◆ **Niveles de severidad**

- ✓ **Baja:** sin descascaramiento.
- ✓ **Media:** descascaramiento menor al 10% de la losa.
- ✓ **Alta:** descascaramiento mayor al 10% de la losa.

- **Fisuras por durabilidad:** se caracteriza por la presencia de grietas finas muy cercanas y con forma de un cuarto de luna. Ocurre en las inmediaciones de las juntas, grietas o bordes del pavimento; se inicia en las esquinas de las losas. La zona agrietada y la circunvecina presenta una coloración más oscura.

Figura 112. Fisuras por durabilidad



◆ **Causas**

- ✓ Ambientes alcalinos
- ✓ Reactividad álcali-sílice de los agregados que conforman el hormigón, cuando estos se congelan y expanden.
- ✓ Por humedecimiento excesivo en el borde del pavimento sumado al exceso de cargas.

◆ **Niveles de Severidad :**

- ✓ **Baja:** Grietas muy compactas, sin trozos sueltos o faltantes.

- ✓ **Media:** Grietas bien definidas, con algunos trozos pequeños sueltos o desplazados.
- ✓ **Alta:** Patrón de la falla bien desarrollado, con una cantidad significativa de trozos sueltos o faltantes. Las áreas dejadas por los trozos desplazados, de hasta 0,1 m², pueden haber sido bacheadas.

6.2. REGULARIDAD SUPERFICIAL DEL PAVIMENTO.

La regularidad superficial es una medida del comportamiento funcional del pavimento, este problema puede afectar al usuario produciendo una grave disminución de su comodidad, seguridad y aumentando los costos de operación, debido a que el pavimento puede producir aceleraciones verticales a los vehículos en movimiento. Además la falta de regularidad del pavimento puede verse fuertemente afectada por la acción del tránsito, por ejemplo, los abultamientos producen aumento en la fuerza dinámica de las ruedas de los autos, lo cual contribuye al incremento de dicho deterioro.

6.2.1. Equipos para medir la regularidad superficial del pavimento

Para conocer el estado superficial de una vía, se puede hacer mediciones con procedimiento manuales, sin embargo, en la auscultación de proyecto de gran longitud existen equipos que facilitan este proceso y dejan para la oficina un trabajo más sencillo. Los equipos usados en campo son:

- ◆ **Mira y nivel:** Este procedimiento corresponde a un sistema de precisión de la topografía clásica, el cual determina el perfil real de la superficie del pavimento,

pero es un procedimiento lento y costoso, lo que lo hace inapropiado en proyectos de grandes longitudes.

- ◆ **Perfilografos:** los perfilografos tiene una rueda sensora montada de manera que proporciona un movimiento vertical libre en el centro del aparato. Las desviaciones en relación con un plano de referencia, establecido desde el marco del perfilografo, son registradas a partir del movimiento de dicha rueda. estos equipos son muy usados en la inspección y control de pavimentos de concreto hidráulico. Algunos ejemplos de esto equipos son el Viágrafo y el perfilografo de California.

Figura 113. Viágrafo



- ◆ **Gherpo:** este equipo realiza una filmación de la imagen de la calzada en planta y se hace el análisis de degradaciones placa por placa individualizándolas y numerándolas.
- ◆ **Equipo de medida de rozamiento transversal (Scrim)** Es un equipo de alto rendimiento para la medida continua de la adherencia entre la rueda y el pavimento, que determina el Coeficiente de Rozamiento Transversal de la

carretera a ensayar. Consiste en un camión equipado con una cisterna de agua que dispone de una rueda lisa de medida colocada en su lado derecho, de forma que la medida se lleva a cabo en la parte de la calzada más solicitada por el tráfico. Delante de la rueda de medida se inyecta un flujo de agua que forma una película líquida de espesor constante. La rueda de medida se sitúa formando un ángulo fijo con el eje longitudinal del camión. La fuerza originada por el rozamiento transversal neumático-pavimento se mide a través de un transductor de presión situado en el eje de la rueda de medida.

En la cabina del camión van ubicados el sistema de adquisición de datos, un monitor que permite visualizar los datos de velocidad y coeficiente de rozamiento, y un teclado que posibilita la introducción de eventos durante la marcha.

Aplicaciones

- ✓ Medida y registro del Coeficiente de Rozamiento Transversal en todo tipo de pavimentos.
- ✓ Por ser un equipo de alto rendimiento se utiliza para la auscultación sistemática de redes de carreteras.

Figura 114. Equipo (Scrim) de medida del rozamiento transversal



6.2.2. Índice de rugosidad internacional o índice de regularidad internacional (IRI)

Debido a la gran cantidad de equipos disponibles en el mercado para medir el perfil y la diferencia entre sus sistemas de medición y registro, la comparación de datos no era compatible con otros países, por esta razón se estableció una correlación que permite dar un estándar de calibración para los distintos tipos de mediciones dadas por los perfilómetros.

El IRI (International Roughness Index) lo cual traduce, (Índice de Rugosidad Internacional) fue el resultado de esta experiencia de correlación, dicho índice es la sumatoria, en valor absoluto, de los desplazamientos verticales a lo largo de un intervalo de distancia, dividido entre su longitud. Este cálculo se basa en un modelo matemático de análisis que puede trabajar con información proveniente de distintos tipos de perfilómetros.

6.3. RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

La resistencia al deslizamiento es el parámetro que permite evaluar la fricción entre las llantas del vehículo y la superficie de rodadura de la vía, evaluando en primer lugar la seguridad del usuario, mediante el coeficiente de fricción.

Para que un pavimento presente una superficie que garantice la adherencia entre las llantas y el pavimento, debe tener una microtextura que asegure la adherencia y una macrotextura que contribuya a la evacuación de agua rápidamente, mejore

la fricción y además impida o dificultando los fenómenos de hidropneumático (que se pueden producir cuando el vehículo circula a altas velocidades y la película de agua es suficientemente espesa, la cual hace que el vehículo pierda el contacto con la superficie).

Teniendo en cuenta estas propiedades de la superficie para garantizar la adherencia entre la llantas y el pavimento, la evaluar la resistencia al deslizamiento se puede realizar de dos formas distintas.

- ✓ midiendo directamente el coeficiente de fricción entre llantas y el pavimento mojado.
- ✓ analizando la macrotextura o capacidad de drenaje superficial del pavimento (para estimar la reducción de la adherencia que se produce al aumentar la velocidad).

El coeficiente de fricción a baja velocidad depende del número de puntos de contacto seco entre la llanta y los áridos del pavimento que se producen tras la ruptura de la película de agua residual producida por la microtextura. Al aumentar la velocidad, disminuye la fricción, esta disminución es tanto menor cuando mejor es la capacidad de evacuación del agua que proporciona la macrotextura.

6.3.1. Equipos para medir la resistencia al deslizamiento

Existe una gran variedad de equipos de medida, que atendiendo a su función y método de medida se pueden diferenciar entre equipo de medida de fricción, de la textura o de función múltiple.

◆ **Equipos de medida de fricción**

- ✓ Péndulo de fricción: Tradicionalmente se han venido caracterizando el coeficiente de resistencia al deslizamiento mediante el péndulo de fricción. Este equipo da una indicación indirecta del grado de rugosidad que proporciona la microtextura del pavimento.

Este ensayo consiste en medir la pérdida de energía de un péndulo de características conocidas provisto en su extremo de una zapata de goma, cuando la arista de la zapata roza, con una presión determinada, sobre la superficie a ensayar y en una longitud fija. Esta pérdida de energía se mide por el ángulo suplementario de la oscilación del péndulo.

Figura 115. British Pendulun



Para medir fricción directamente se tiene que emplear, equipos con mayor rendimiento, acoplados a un vehículo o remolcados. Para este caso se

presentan a continuación diferentes tipos, según las características de la rueda de medida.

- ✓ Scrim: Rueda oblicua respecto del sentido de la marcha. Es un equipo de alto rendimiento para la medida continua de la adherencia entre la rueda y el pavimento, que determina el Coeficiente de Rozamiento Transversal de la carretera a ensayar.

Consiste en un camión equipado con una cisterna de agua que dispone de una rueda lisa de medida colocada en su lado derecho, de forma que la medida se lleva a cabo en la parte de la calzada más solicitada por el tráfico. Delante de la rueda de medida se inyecta un flujo de agua que forma una película líquida de espesor constante. La rueda de medida se sitúa formando un ángulo fijo con el eje longitudinal del camión. La fuerza originada por el rozamiento transversal neumático-pavimento se mide a través de un transductor de presión situado en el eje de la rueda de medida. En la cabina del camión van ubicados el sistema de adquisición de datos, un monitor que permite visualizar los datos de velocidad y coeficiente de rozamiento, y un teclado que posibilita la introducción de eventos durante la marcha.

Figura 116. Scrim (rueda oblicua)



- ✓ Rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento variable (se puede usar el Grip tester). Este equipo es de reducidas dimensiones y peso, adaptable fácilmente a cualquier tipo de vehículo, que tiene como accesorios un tanque de agua de 500 litros. El mecanismo ubicado en su rueda individual con frenada al 15%, tiene una medida constante del coeficiente de fricción o número de adherencia (grip number) (carga / resistencia a la rodadura), que es transmitido de continuamente a un ordenador situado en la cabina del vehículo el cual almacena datos a través de un completo e intuitivo software, que presenta a modo de resumen o gráficos la información obtenida y demás anotaciones referentes al kilometraje, velocidad, señalizaciones y posibles problemas encontrados en el ensayo, todo ello introducido por abreviaturas disponibles y usuales.

Figura 117. Grip tester



◆ **Equipos de medida de la textura.**

Para la caracterización de la macrotextura de un pavimento, se utilizan fundamentalmente tres procedimientos:

- ✓ Método volumétrico, método de la mancha de arena que determina la profundidad media de textura, la cual es mayor cuanto más rugosa sea la macrotextura.

Figura 118. Círculo de arena ASTM E-965



- ✓ Medida de drenaje superficial (drenómetros), determinando el tiempo de evacuación de un volumen conocido.

Figura 119. Drenómetro.



6.3.2. Índice de fricción internacional (IFI)

Debido a que en la actualidad se dispone de una gran diversidad de equipos capaces de tomar un gran número de datos, los cuales son difícilmente compatibles, y ante la preocupación mundial por establecer una relación directa entre los resultados del coeficiente de rozamiento y de la textura, proporcionados por los distintos equipos; la Asociación Internacional Permanente de los Congresos de Carreteras AIPCR, hoy Asociación Mundial de Carreteras, lograron elaborar en 1992, una escala universal de fricción bien definida denominada IFI

(Índice de Fricción Internacional) a la que puede referirse cualquier equipo utilizado.

Las conclusiones del experimento han probado la necesidad de representar ese índice, IFI, por dos números procedentes de dos medidas, una de fricción y otra de macrotextura.

Por tanto, el IFI viene indicado por dos números expresados entre paréntesis separados por una coma (F, M), el primero representa la fricción (F) y el segundo la macrotextura (M). El primero, es un número adimensional y el segundo, un número positivo sin límites determinados y unidades de velocidad (km./h). El valor cero de fricción indica deslizamiento perfecto y el valor uno adherencia perfecta.

La definición del IFI, tal y como se deduce del informe del experimento es la siguiente: el Índice de Fricción Internacional es una escala de referencia basada en el Modelo AIPCR (que relaciona la fricción con la velocidad de deslizamiento), modelo que sirve para estimar la constante de referencia de velocidad (S_p) y la de fricción a 60 km./h (F_{60}) de un pavimento. El par de valores (F_{60} y S_p) expresan el IFI de un pavimento y permiten calcular el valor de fricción, $F(S)$, a cualquier velocidad de deslizamiento (S).

$$F(S) = F(60) * e^{\frac{(60-S)}{S_p}}$$

Pero a pesar del avance que se obtiene con la determinación del IFI en la interpretación del fenómeno de la resistencia al deslizamiento, aun existen muchos aspectos sin resolver, el principal de los cuales es la necesidad de emplear alguno de los equipos usados en el experimento para calibrar cualquier otro equipo, lo cual lo hace poco practico.

6.4. AUSCULTACIÓN ESTRUCTURAL.

La auscultación de los pavimentos se realiza mediante equipos que proporcionen información precisa y cuantitativa sobre el estado de sus características estructurales y superficiales.

La auscultación estructural de pavimento bituminoso se realizará con equipos que evalúen la capacidad resistente del pavimento a través de la medida de la deflexión. La cual puede ser instantánea (este tipo de deformación se presenta en la medida que el pavimento se comporte de forma flexible. Este proceso de deformación de un pavimento es normal, pero si un pavimento presenta una considerable deformación instantánea, no presta un servicio adecuado para el usuario ya que la superficie deja de ser regular) y permanente (La cual se caracteriza por hacer que la superficie del pavimento se presente de una forma irregular, contribuyendo así, a afectar la calida de transito de los vehículos y aumenta los costos de operación, al igual que el mantenimiento de los automóviles. Dicho problema de deformaciones se produce por: Deficiencia en los procesos constructivos, irregularidades superficiales, condiciones ambientales o por las cargas que impone el tráfico)

La auscultación de pavimento de hormigón y de ciertas características específicas de los pavimentos semi-rígidos se realizará atendiendo a sus singularidades, especialmente en lo relativo a la transmisión de cargas entre ambos lados de las juntas o de las grietas que puedan existir.

Además, la regularidad superficial, cuantificada a través del índice de regularidad internacional (IRI), deberá ser utilizada para la definición del tipo de actuación en

rehabilitaciones superficiales y para establecer la necesidad de una eventual capa de regularización o de un fresado en ambos tipos de rehabilitación.

6.4.1. Equipos empleados para la auscultación de pavimentos

- ◆ **Viga Benkelman:** Es un deflectómetro mecánico simple, el cual consta de una palanca suspendida de un bastidor, la cual transmite la deflexión vertical del punto de medida a un comparador. Con este equipo se puede realizar la determinación estática de la deflexión elástica recuperada del firme y determinación de la deformada originada por la carga con relación a un punto de medida fijo.

Características técnicas

- ✓ Carga: eje simple de rueda doble, cargado con 8.2 toneladas.
- ✓ Presión de inflado de llantas 5.6 kg./cm².
- ✓ hacer medida cada 100 m en la huella externa.
- ✓ medir temperatura del pavimento.
- ✓ Bastidor: viga de sustentación de la palanca de medida y del comparador.
- ✓ Palanca de medida de 3,60 m.
- ✓ Comparador: aparato con limbo dividido en 0,01 mm con recorrido de 12 mm.
- ✓ Palpador: pieza metálica que reposa sobre el suelo en el punto de medida.

Figura 120. Viga Benkelman



- ◆ **Deflectógrafo tipo Lacroix:** es uno de los primeros equipos denominados “de alto rendimiento”. Estos sistemas permiten obtener las deflexiones en ambas rodadas, registrando valores cada 5 m. En cada punto se realizan del orden de 60 medidas de la de flexión, lo que permite obtener la línea de influencia de la misma. A pesar de esto, no permite obtener, al menos directamente, el cuenco de deflexiones.

Este equipo se puede usar para Medir y registrar las deflexiones de un firme de forma casi continua bajo la carga de un eje tipo de camión, además se puede obtener la línea de influencia de la deflexión en cada punto de medida.

Características técnicas

- ✓ Velocidad de ensayo de 3-4 km/h.
- ✓ Obtención de datos en dos líneas de medida.
- ✓ Distancia entre puntos de ensayo de 5 m.

- ✓ En cada punto de ensayo se toman del orden de 60 lecturas de deflexión (permitiendo la obtención de la línea de influencia de la deflexión), siendo la longitud total de medida de 1,5 m.
- ✓ La recogida y tratamiento de datos se efectúa por ordenador

Figura 121. Deflectógrafo Iacroy.



- ◆ **Deflectómetro de impacto de 150 kN:** Equipo constituido por una masa que se deja caer por gravedad, desde una altura determinada, sobre una placa, provista de un sistema de distribución, que transmite la carga de manera uniforme a la superficie sobre la que se apoya.

Este equipo se puede emplear para evaluar de la capacidad estructural de pavimentos flexibles, semi-rígidos y rígidos, evaluar la transferencia de cargas en juntas de firmes de hormigón, entre otros.

Características técnicas

- ✓ La onda de carga simula la producida por un vehículo circulando a 70 km/h. El tiempo de carga puede ser de 40 ó 60 milisegundos y la carga máxima equivalente es de 150 kN.

- ✓ La deflexión debida a la carga se mide a través de siete sismómetros situados uno en el centro de la placa, y los otros a distancias de 30, 45, 60, 90, 120 y 150 cm.
- ✓ Dispone de un sensor de infrarrojos para medir la temperatura de la superficie del pavimento.
- ✓ El rendimiento del equipo (suponiendo una distancia entre puntos de medida de 25 m) es de aproximadamente 2 km/h.

Figura 122. Deflectómetro de impacto de 150 kN.



- ◆ **Viágrafo:** Equipo de medida de tipo geométrico, que permite obtener valores de la regularidad superficial de un firme de carretera.

Características técnicas

- ✓ *Consta de ocho ruedas alineadas, unidas entre sí por medio de balancines, y una rueda libre vertical colocada en posición central y alineada con las otras ocho.*
- ✓ *La velocidad de ensayo es de 2-8 km/h.*
- ✓ *El registro de datos se realiza mediante ordenador.*

Figura 123. Viógrafo



- ◆ **Perfilómetro pivotante:** Es un equipo electrónico de alta precisión, para la evaluación de la regularidad superficial de los pavimentos. Mide y graba, automáticamente, en la memoria del microordenador incorporado, la diferencia de cotas entre puntos separados secuencialmente 250 mm, pivotando alternativamente alrededor de sus dos patas de apoyo. Los datos de elevación registrados se utilizan mediante un programa preparado al efecto, para la obtención del Índice de Regularidad Internacional (IRI). El empleo es manual y por un solo operador.

Características técnicas

- ✓ Sistema de medida en caja estanca dotada de dos patas de apoyo con una distancia de 0,25 m entre ellas.
- ✓ Calculadora programable Radio Shack TRS-80 para el (dipstick), para toma de datos y almacenamiento de los mismos.

- ✓ Calculadora programable Mininote™ 3000 para el (DS 2000), para toma de datos y almacenamiento de los mismos.
- ✓ Baterías de alimentación.
- ✓ Bastón de manejo.
- ✓ Rendimiento: 200 m/día.

Figura 124. Perfilómetro pivotante (Dipstick)



Figura 125. Perfilómetro pivotante (DS 2000)



6.4. DIMENSIONAMIENTO DE CAPAS DE REFUERZO.

Después de realizar los análisis correspondientes a los tramos viales, a veces es necesario construir capas de refuerzo, por esta razón a continuación se presentan algunos métodos para el dimensionamiento de dicha capa.

6.4.1. Método basado en la deflexión Benkelman

- ✓ Ecuación propuesta por el instituto del asfalto para el cálculo de la deformación admisible.

$$D_{adm} (mm) = 27,7141 * N^{-0,2491} \quad \text{Ecuación (57)}$$

- ✓ Ecuación propuesta por el Dr. Ruiz para el cálculo de la deformación admisible y el espesor de refuerzo.

$$D_{adm} (mm) = 35,4456 * N^{-0,2497} \quad \text{Ecuación (58)}$$

$$H_{ref} (cm) = \frac{R}{0.434} \log \left(\frac{D_{existente}}{D_{adm}} \right) \quad \text{Ecuación (59)}$$

Donde:

H_{ref} : Espesor de Refuerzo (cm.)

- $D_{\text{existente}}$: Deflexión Recuperable, característica del pavimento antes del refuerzo en centésimas de milímetros.
- D_{adm} : Deflexión Recuperable, característica del pavimento después del refuerzo en centésimas de milímetros.
- R : Coeficiente con dimensiones de un espesor, que expresa la capacidad del material de refuerzo para reducir la Deflexión del pavimento subyacente. Este parámetro esta entre un intervalo de 16-18.

Ejemplo resuelto

Establecer el refuerzo para un pavimentos flexible para el cual se espera un $N_{\text{futuro}} = 15'000.0000$ de ejes equivalentes y la deflexión medida en la viga Benkelman es 0.5564 mm y $S_d=0.2345$ mm.

Solución:

- a. calcular la deflexión existente

$$D_{\text{existente}} = \bar{D} + 2S_d$$

$$D_{\text{existente}} = 0.5564 + 2(0.2345) = 1.0254$$

- b. Calculo de la deflexión admisible usando la ecuación 23 o 24 para este caso, se usara la ecuación 24.

$$D_{\text{adm}} (mm) = 35,4456 * N^{-0.2497} \quad \rightarrow \quad D_{\text{adm}} = 35,4456 * (15'000.000)^{-0.2497} = 0.5724$$

c. Usando la ecuación 25 se calcula el espesor de refuerzo.

$$H_{ref} (cm) = \frac{R}{0.434} \log\left(\frac{D_{existente}}{D_{adm}}\right) \rightarrow H_{ref} = \frac{16}{0.434} \log\left(\frac{1.0254}{0.5724}\right) = 9.34cm \approx 10cm$$

6.4.2. Método (AASHTO-93)

➤ Método con base en el número estructural

Según la aashto-93 para el cálculo del espesor de refuerzo se debe calcular:

- ✓ Número estructural requerido para el tránsito futuro

SN requerido = (este se obtiene usando la (ecuación 18))

- ✓ Determinación del número estructural efectivo para el pavimento existente

→ **Según el método de las condiciones de la vía**

$$SN \text{ efectivo} = a_1h_1 + a_2h_2m_2 + a_3h_3m_3$$

Ejemplo resuelto

Determinar el espesor de refuerzo si se tiene la siguiente información de una estructura de pavimento.

$$N_{\text{futuro}} = 15 \cdot 000000$$

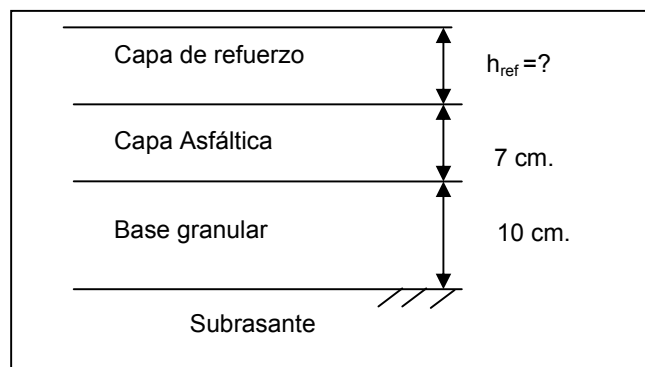
$$M_{\text{Rsr}} = 10500 \text{ Psi.}$$

$$\text{Confiabilidad del 97\%} \rightarrow Z_R = -1.882$$

$$\Delta \text{PSI} = 2$$

$$S_0 = 0.45$$

El material que se empleara para el refuerzo será una mezcla densa en caliente con un $E = 400000$ psi Mediante algunas pruebas se obtuvo información sobre la capa asfáltica existente y la subbase, con los cuales se conocieron sus espesores aproximados y que el CBR de la base granular es de 80%.



Solución:

1. Se calcula el $SN_{\text{necesario}}$ con la ecuación de diseño de pavimentos flexibles mediante el método AASHTO.

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \Delta \text{PSI}}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log M_R - 8.07$$

$$SN_{\text{necesario}} = 4.91$$

2. Cálculo de espesor de refuerzo según el método de las condiciones de la vía.

$$SN_{\text{existente}} = (7/2.54) * (0.13) + (10/2.54) * (0.08) = 0.673$$

$$\rightarrow SN_{\text{refuerzo}} = SN_{\text{necesario}} - SN_{\text{existente}} = 4.91 - 0.673$$

$$SN_{\text{refuerzo}} = 4.237$$

$$\rightarrow SN_{\text{refuerzo}} = a_1 * h_{\text{refuerzo}}$$

Por lo tanto despejando, el espesor de refuerzo tenemos:

$$h_{\text{refuerzo}} = 9.63 \text{ pulg.} \approx 25 \text{ cm.}$$

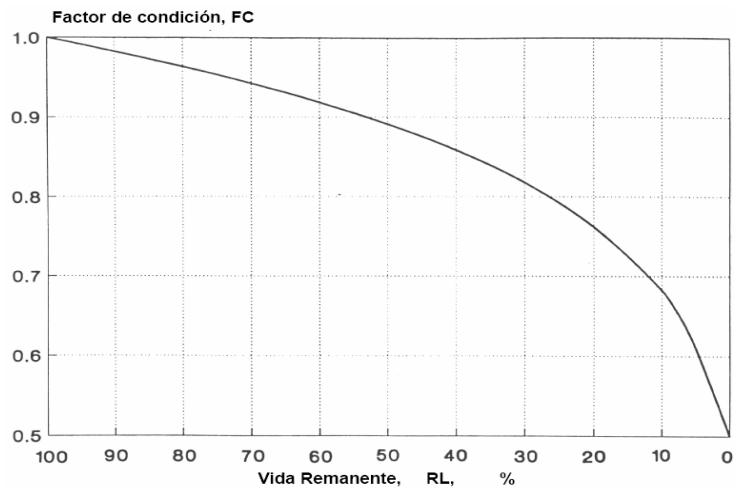
→ **Según el método de vida remanente**

- Determinación remanente de vida

$$RL = 100 \left(1 - \frac{N_p}{N_{1.5}} \right)$$

- Mediante la figura obtener el factor de condición.

Figura 126. Relación de pérdida de factor de condición y pérdida de vida



- calculo del número estructural efectivo

$$SN = CF * SN_0$$

Ejemplo resuelto

Calcular el espesor de la capa de refuerzo de la siguiente estructura de pavimento que presenta las siguientes características, usando el método de vida remanente.

Ejes equivalente de 82 kN en el carril de diseño cunado se construyo, $N_p=40000$ y los ejes equivalente de 82 kN en el carril de diseño que producen la falla de la vía existente $N_{1.5}= 1`140.000$.

Además se tiene la siguiente información sobre las capas que conforman el pavimento: Espesor de concreto asfáltico de la superficie existente $h_1=5$ pulg.

Coefficiente estructural $a_1=0.44$. Espesor de la base $h_2=8$ pulg. Coeficiente estructural $a_2=0.14$ y $m_2=1$.

Solución:

a. calculo de la vida remanente

$$RL = 100 \left(1 - \frac{N_p}{N_{1.5}} \right) \quad \text{Entonces} \quad RL = 100 \left(1 - \frac{400000}{1140000} \right) = 65\%$$

b. con este valor de vida remanente y usando la gráfica 101 se obtiene el factor de condición.

$$FC = 0.95$$

c. tomando la formula de diseño de pavimentos flexible por el método AASHTO calculamos son

$$\begin{aligned} SN_0 &= a_1 * h_1 + a_2 * h_2 * m_2 + a_3 * h_3 * m_3 \\ SN_0 &= (0.44) * (5) + (0.14) * (8) * (1) = 3.32 \end{aligned}$$

d. Ahora se calcula el número estructurar efectivo

$$\begin{aligned} SN \text{ efectivo} &= CF * SN_0 \\ SN \text{ efectivo} &= 0.95 * 3.32 = 3.154 \end{aligned}$$

e. Calculo de capacidad estructural futura

Para determinar el número estructura para un transito futuro se tiene la siguiente información: Ejes equivalente de 82 kN en el carril de diseño para

el nuevo periodo de diseño $N_f = 2'400.000$, $M_R = 6000$ psi, confiabilidad para una capa de refuerzo de 90%. Desviación estándar total $S_0 = 0.45$ y una pérdida de serviciabilidad de diseño de $\Delta PSI = 2$

Con la ecuación 18 se calcula el SN_{futuro}

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \Delta PSI}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log M_R - 8.07$$

$$SN_{\text{futuro}} = 4.2$$

f. Cálculo del espesor de refuerzo

Para la sobrecapa se usa una capa de concreto asfáltico que tiene un módulo elástico de 300000 cuyo coeficiente estructural es $a_1 = 0.37$.

$$SN_{\text{refuerzo}} = SN_{\text{futuro}} - SN_{\text{efectivo}}$$

$$SN_{\text{refuerzo}} = 4.2 - 3.154 = 1.046$$

$$\rightarrow SN_{\text{refuerzo}} = a_1 \cdot h_{\text{refuerzo}}$$

➤ **Método con base en la deflexión bajo placa**

Para este método se presentan las siguientes ecuaciones:

$$d_o = 1.5 p * a \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{Ep}{M_R}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{Ep} \right\}$$

Ecuación (60)

Donde:

- d_o : deflexión en el centro de la placa (plg).
- p : Presión aplicada por la placa (psi).
- a : Radio de la placa (plg).
- D : espesor total del pavimento (plg).
- M_R : Módulo resiliente de la subrasante (psi).
- Ep : Módulo de elasticidad efectivo del pavimento.

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r * r}$$

Ecuación (61)

- M_R : Módulo resiliente de la subrasante (psi).
- P : carga aplicada en (lb)
- d_r : deflexión a una distancia r en (plg).
- r : distancia al centro de la carga en (plg.)

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(D \sqrt[3]{\frac{Ep}{M_R}} \right)^2 \right]}$$

Ecuación (62)

Donde:

- a_e :radio del bolbo de presiones en la interface subrasante pavimento (plg).
- a : radio de la placa (plg)

D : Espesor del pavimento (plg)

E_p : Módulo elasticidad del pavimento (psi)

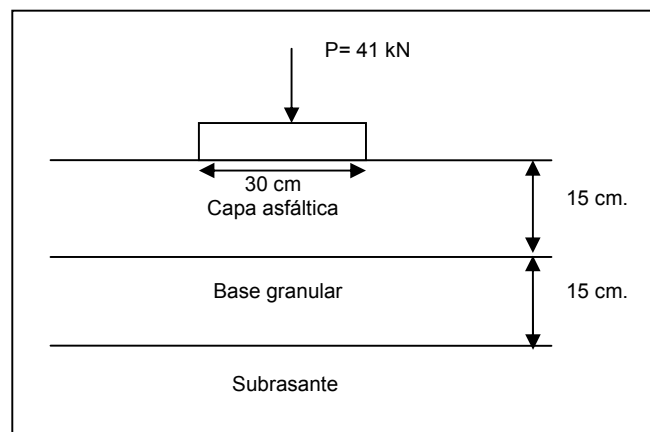
$$S_{Nexistente} = 0.045 * D * \sqrt[3]{E_p}$$

Ecuación (63)

Ejemplo resuelto

Diseñar la capa de refuerzo para un $N_{futuro} = 17'000.000$ ejes equivalentes, si se tiene una confiabilidad del 95%, $\Delta PSI=2$, $S_0=0.4$, la carpeta asfáltica existente presenta un coeficiente estructural de 0.44. Adicionalmente se tiene el diámetro de la placa, que es de 30 cm., las deflexiones tomadas con un deflectómetro de impacto (F.W.D), las cuales son: $d_0=300 \mu m$, $d_{30}=216 \mu m$, $d_{60}=173 \mu m$, $d_{90}=88 \mu m$, $d_{120}=26 \mu m$.

Visualización de la estructura actual.



Solución:

- Se calcula el módulo resiliente mediante la ecuación 27. para las deformaciones a 60, 90 y 120 cm.

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r * r}$$

$$M_R = \frac{0.24 * 9442lb.}{8.50 \times 10^{-3} pu\lg. * 23.62 pu\lg.} = 14088Psi$$

Entonces para:

$d_{60}=173 \mu m$ se tiene un $M_R=14088 Psi$. Se escoge por F.S.

$d_{90}=88 \mu m$ se tiene un $M_R=18485 Psi$.

$d_{120}=26 \mu m$ se tiene un $M_R=47029 Psi$

b. Ahora se calcula el módulo elástico, de acuerdo con la ecuación 26.

$$d_o = 1.5 p * a \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{Ep}{M_R}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{Ep} \right\}$$

$$1.18 \times 10^{-3} pu\lg. = 1.5(86.18 Psi) * (5.9 pu\lg.) \left\{ \frac{1}{(14088 Psi) \sqrt{1 + \left(\frac{11.81}{5.9} \sqrt[3]{\frac{Ep}{14088}} \right)^2}} + \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{11.81}{5.9} \right)^2}}}{Ep} \right\}$$

Despejando de esta ecuación E_p se tiene un valor de $E_p=248000 Psi$.

c. Con la ecuación 29, se calcula el SN existente.

$$SN_{existente} = 0.0045 * D * \sqrt[3]{Ep}$$

$$SN_{existente} = 0.0045 * 11.81 * \sqrt[3]{248000} = 3.34$$

- d. Ahora con los mas datos y usando la ecuación de AASHTO para diseño de pavimento flexibles, se calcula el SN futuro.

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \Delta PSI}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{2.19}}} + 2.321 \log M_R - 8.07$$

$$NS \text{ futuro} = 4.26$$

- e. con los datos obtenidos en los ítems anteriores de SN existente y futuro, se calcula el SN de refuerzo.

$$SN \text{ refuerzo} = SN \text{ futuro} - SN \text{ existente}$$

$$SN \text{ refuerzo} = 4.26 - 3.34 = 0.92$$

- f. con el valor de SN de refuerzo se calcula el espesor de refuerzo.

$$SN \text{ refuerzo} = a_1 * h \text{ refuerzo}$$

$$h \text{ refuerzo} = \frac{SN \text{ refuerzo}}{a_1} = \frac{0.92}{0.44} = 2.1 \text{ pulg.} \approx 5.5 \text{ cm.}$$

Para las condiciones del problema, el pavimento necesita una capa de refuerzo con un espesor de 5.5 cm.

CONCLUSIONES

La elaboración del presente proyecto de grado reafirmó la necesidad de construir un documento claro, organizado y actualizado sobre los temas relacionados específicamente con la clase de ***Diseño de Pavimentos del plan de estudios de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander***, el cual integra y recopila en un solo texto toda la información dispersa en diferentes fuentes tales como libros, normas y documentos encontrados en Internet, a fin de facilitar el aprendizaje de los estudiantes.

El trabajo de recopilación y análisis de información realizado durante la elaboración de la presente guía conceptual permitió determinar la mejor estructura para organizar el contenido del libro, el cual está diseñado con base en el programa de la asignatura, siguiendo una secuencia lógica que inicia con la introducción y ambientación hacia la historia de los pavimentos y posteriormente abarca todos los temas relacionados con la vida de los muros, desde los distintos materiales que se pueden emplear para su construcción, hasta las diferentes patologías que se presentan en sus estructuras durante su vida útil.

Las tablas, ilustraciones, figuras y problemas han sido seleccionados con el propósito de complementar la explicación teórica de cada uno de los temas para permitir al lector una mejor asimilación de los mismos y dar una idea de sus posibles aplicaciones en la vida real.

Durante el transcurso de éste semestre el documento actual estará sujeto a posibles modificaciones por parte del profesor encargado de la asignatura y los estudiantes, se espera que en el próximo semestre se publique la guía definitiva.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. Guide for Mechanistic- Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board. National Research Council. Illinois. 2002.

CORONADO ITURBIDE, Jorge. Manual centroamericano para el diseño de pavimentos. USAID Y SIECA. Guatemala, 2002.

CORONADO ITURBIDE, Jorge. Manual centroamericano de mantenimiento de carretera. Tomo I segunda edición, SIECA. Guatemala, 2004.

GARNICIA ANGUAS, Paúl; RICO RODRÍGUEZ, Alfonso y TÉLLEZ GUTIÉRREZ, Rodolfo. Pavimentos Flexibles: Problemáticas, Metodologías de diseño y Transporte. Instituto Mexicano de Transporte. México, 1998.

FORERO ACEVEDO, Sergio Enrique y GRACIA HERRERA, Francisco Adrián. Estado del Arte de las Caracterización y Diseño de Pavimentos Flexibles. Proyecto de grado, Universidad industria de Santander. Bucaramanga, 2001.

HUANG, Yang H. Pavement Analysis and Design, PRENTICE HALL, New Jersey, 1993.

INVIAS Y MINISTERIO DE TRANSPORTE. Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. 2002. 82.p.

INVIAS. Actualización de las Especificaciones generales de Contracción de Carreteras para los Contratos de Obra celebrados por el Instituto Nacional de Vías. 2007.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Colombinas para la Presentación de Tesis de Grado, NTC 1486 5ª actualización.

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Reimpresión segunda edición. Universidad Católica de Colombia Ediciones y Publicaciones. Bogota, Colombia, 2001.

REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Diseño racional de pavimentos. CEJA. Bogota, Colombia, 2003. 586.p.

Rico Rodríguez, Mario y DEL CASTILLO Hermilio. La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres II. Editorial Limusa. México, 1996.

Paginas Web consultadas

<http://www.invias.gov.co>

<http://www.e-asfaltos.com>

<http://www.miliarium.com>

<http://www.construaprende.com>

<http://www.elprisma.com>

<http://www.umng.edu.co>

<http://training.ce.washington.edu>

<http://training.ce.washington.edu>

<http://www.usace.army.mil>

<http://www.wsdot.wa.gov>

<http://www.camneros.com>